



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

«ОСОБЕННОСТИ СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ВИХРЕВОЙ
ДИНАМИКИ ОНЕЖСКОГО И ЛАДОЖСКОГО ОЗЕР ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ»

Исполнитель Благодатских Егор Алексеевич

Руководитель кандидат физико-математических наук

(ученая степень, ученое звание)

Фролова Наталия Сергеевна

(фамилия, имя, отчество)

Научный консультант кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Атаджанова Оксана Алишеровна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович

(фамилия, имя, отчество)

«26» июня 2023 г.

г. Санкт-Петербург

2023 г.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

«ОСОБЕННОСТИ СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ВИХРЕВОЙ
ДИНАМИКИ ОНЕЖСКОГО И ЛАДОЖСКОГО ОЗЕР ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ»

Исполнитель Благодатских Егор Алексеевич

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Фролова Наталия Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

Научный консультант кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Атаджанова Оксана Алишеровна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой _____
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Густоев Дмитрий Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

г. Санкт-Петербург
2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	2
1. Объект и предмет исследования.....	4
1.1. Физико-географическое описание Онежского и Ладожского озер.....	4
1.2. Субмезомасштабные вихри	13
1.2.1. Понятие о субмезомасштабе.....	13
1.2.2. Субмезомасштабные вихревые структуры в естественных водоемах	16
1.3. Обзор существующих методов регистрации проявлений субмезомасштабных вихрей	18
1.3.1. Контактные методы	18
1.3.2. Дистанционные методы	20
2. Материалы и методы	24
2.1. Исходные данные	24
2.2. Методы исследования	24
3. Пространственно-временная изменчивость характеристик субмезомасштабных вихрей в крупных стратифицированных озерах	27
3.1. Онежское озеро.....	27
3.2. Ладожское озеро	32
Заключение	38
Список литературы	40

Введение

Крупномасштабные (синоптические) вдольбереговые циркуляции, подобные вихревым, являются повсеместной особенностью не только океанов, но и больших озер. Они играют решающую роль в горизонтальном и вертикальном распределении биологических, химических и физических параметров, которые могут влиять на качество воды. Актуальность данной работы определяется тем, что кроме крупномасштабной циркуляции в озерах возникают явления меньшего масштаба, влияние на которых силы Кориолиса не является определяющим. Например, явления, относящиеся к субмезомасштабному интервалу изменчивости гидрологических полей. Этому интервалу соответствует характерный пространственный масштаб от сотен метров до единиц километров и характерное время сосуществования от часов до суток. Понимание и описание явлений и структур в субмезомасштабном интервале изменчивости, как переходного звена передачи энергии от синоптических процессов к турбулентности, является фундаментальной задачей динамики водных объектов, без которой невозможно качественное описание процессов переноса вещества и функционирования водных экосистем. До настоящего времени представления о субмезомасштабных процессах даже в таких, казалось бы, постоянно исследуемых озерах, как Ладожское, носят отрывочный характер (Румянцев, 2015; Филатов, 2019). Информация о них сводится лишь к констатации факта их существования несмотря на то, что, например, малые вихри могут существенно влиять на интенсивность обмена через термобар и вызывать забросы теплых вод в «холодную» зону термобара (Кондратьев и др., 1988). Недостаточная изученность субмезомасштабных явлений объясняется двумя основными причинами – сложностью одновременного выполнения высокоразрешающих контактных измерений в различных точках акватории и малыми пространственно-временными масштабами этих процессов, что требует совершенствования существующих и создания новых методик наблюдений за данными процессами.

Цель выпускной квалификационной работы заключается в количественной оценке пространственно-временной субмезомасштабной вихревой динамики Онежского и Ладожского озер по данным спутниковых радиолокационных наблюдений с мая по октябрь 2021–2022 гг.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить литературный обзор по субмезомасштабным вихрям и их проявлениям в крупных стратифицированных озерах.
2. Детектировать на радиолокационных изображениях Онежского и Ладожского озер за безлёдный период 2021-2022 годов проявления субмезомасштабных вихревых структур.
3. Выполнить статистическую обработку полученных данных.
4. Построить карты распределения проявлений вихревых структур на исследуемых акваториях.
5. Выявить особенности пространственно-временной изменчивости проявлений вихревых структур на каждой из рассматриваемых акваторий.

1. Объект и предмет исследования

1.1. Физико-географическое описание Онежского и Ладожского озер

Онежское озеро

Онежское – второе по величине пресноводное озеро Европы. Площадь зеркала озера составляет 9720 км², из которых 250 км² приходится на 1500 островов (Рис. 1)

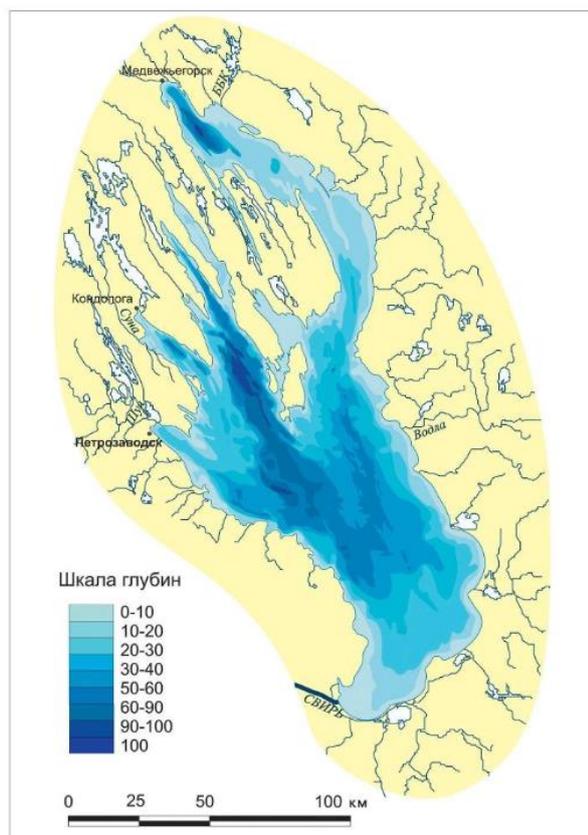


Рис. 1 Карта глубин Онежского озера

Протяженность озера с севера на юг - 248 км, с запада на восток - 96 км. Бассейн озера расположен на двух контрастирующих частях земной коры с различными геологическими историями - Балтийском щите и Русском плато. Его природа характеризуется выраженной неоднородностью, обусловленной не только размерами, но и геологией котловины, неравномерным распределением притока, различной степенью антропогенной нагрузки. Бассейн сложен труднорастворимыми архейско-протерозойскими породами, и поэтому минерализация вод притоков и самого озера очень низкая – 37 мг/л, что в 1,5 ниже, чем в воде Ладожского озера. Объем водной массы озера достигает 295 км,

средняя глубина - 30 м, максимальная - 120 м. Южная часть характеризуется плавными очертаниями низменных берегов [5].

Наибольшие скорости течений характерны для верхнего слоя воды и составляют в среднем 5 см/с, достигают по расчетам 12-15 см/с (Рис. 2). С глубиной характер циркуляции сохраняется, но с уменьшением модуля скорости течений. Летом и осенью система течений становится сложнее, так как в формировании течений более существенное влияние оказывает ветер (Рис. 3).



Рис. 2 Схема поверхностных течений в период термобара (июнь)

Средние скорости течений на верхнем горизонте в открытом озере составляют 10-20, а в закрытых губах 5-10 см/с, на нижнем же горизонте они равны 4-6 и 3-5 см/с. Максимальные скорости течений в самой глубоководной части озера достигают 130 см/с, а в закрытых губах и мелководных районах они уменьшаются до 20-30 см/с.

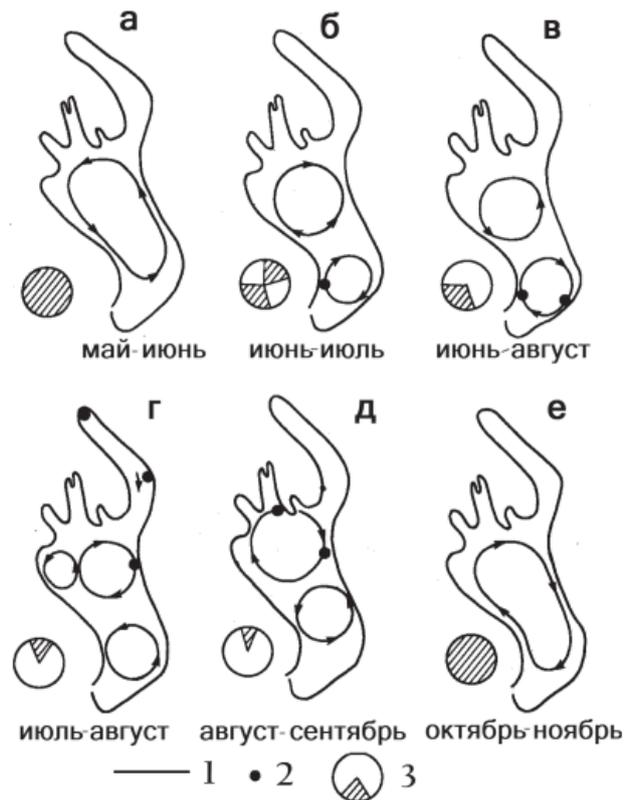


Рис. 3 Схема интегральной циркуляции вод для различных сезонов года
 Условные обозначения к рисунку: 1. Направление циркуляции вод. 2. Зона проявления апвеллинга.
 3. Направление скорости ветра, при котором возникает апвеллинг

В течение года в этой части Карелии преобладают ветры южной четверти со средней скоростью 3-4 м/с (Рис. 4). На формирование ветрового режима районов Онежского озера большое влияние оказывают физико-географические особенности отдельных участков водоема. В Повенецком заливе, который вытянут с юго-востока на северо-запад, преобладающими являются ветры именно этих направлений. Над восточным побережьем Онеги господствуют южные, юго-западные и восточные ветры, над западным побережьем озера преобладают ветры западных и юго-западных направлений. На островах в озере ветровой режим несколько отличается от берегового, поскольку отсутствуют искажения, вызванные особенностями рельефа. Значительно возрастает повторяемость северных ветров и снижается повторяемость ветров западных направлений. Скорости ветра всех направлений различаются мало, составляют в среднем от 5.5 до 7 м/с и всегда превышают скорости ветра на береговых станциях.

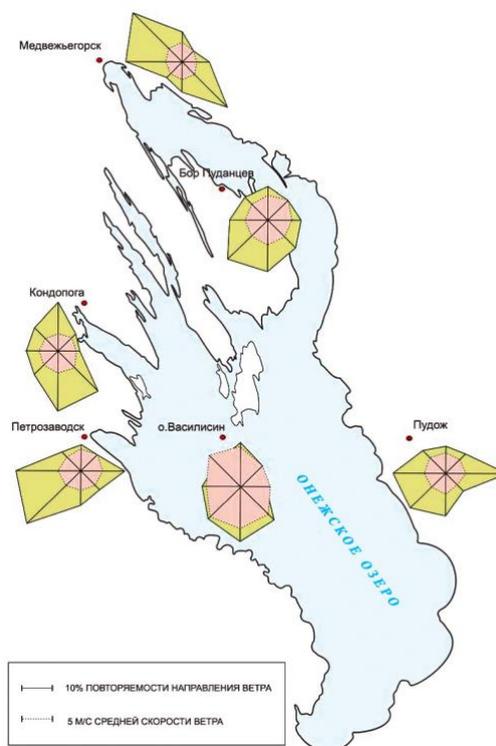


Рис. 4 Среднегодовое повторение направлений и скорости ветра за 1961-1990 гг. в районе Онежского озера

Различия в термике открытых и прибрежных районов хорошо заметны при сравнении хода температуры поверхности воды на островных и береговых водомерных постах. Весной и в первую половину лета температура у островов Василисин и Климецкий ниже, чем на береговых постах. К концу лета температура между начавшими охлаждаться прибрежными районами и открытой частью водоема выравнивается. Осенью глубоководные районы охлаждаются медленнее, и более высокая температура в них сохраняется до наступления зимы. Температура поверхности воды в открытой части озера поднимается в середине и конце июня до $18^{\circ} - 20^{\circ}$, а в наиболее теплые годы даже до $23^{\circ} - 24^{\circ}$. В шхерном районе, в заливах и губах летом вода еще теплее ($24^{\circ} - 25^{\circ}$, а иногда и $26^{\circ} - 27^{\circ}$). В августе резких перемен не наблюдается [6].

Во второй половине лета озеро начинает охлаждаться, усиливается перемешивание вод, выравнивающее температуру верхних и глубинных слоев. Этот процесс приводит к осенней гомотермии. Охлаждение, как и весеннее нагревание, проходит по-разному в открытой и прибрежной частях озера.

Онежское озеро относится к димиктическим [17]. Димиктическими называются озера, температура которых на поверхности воды дважды в год переходит через 4°C, температуру наибольшей плотности воды, что приводит к полному вертикальному перемешиванию от поверхности до дна. Димиктические озера представляют собой наиболее распространенный тип термической стратификации, наблюдаемый в большинстве озер прохладных умеренных регионов мира. В зависимости от горизонтальных размеров озер и распределения глубин в димиктических озерах в весенний период нагревания и осенний период охлаждения может возникать термическая фронтальная зона. Это такой же барьер плотности, как слой температурного скачка, разделяющий летом воды озера на термические вертикальные зоны. Он назван термическим баром или термобаром. Впервые явление термобара изучил на Ладожском, а затем и на Онежском озере научный сотрудник Лаборатории озероведения ЛГУ А. И. Тихомиров. [15]

Термобар затрудняет обмен вод между центральными и прибрежными районами. Он возникает весной и осенью, в период охлаждения озера, когда на глубоких местах еще сохранился значительный запас тепла, а на мелководье он уже исчерпан.

Термобар разграничивает глубокие и мелкие участки озер не только по термическим признакам. Он влияет и на распределение вод с различными физико-химическими свойствами и на течения. Положение термобара хорошо заметно по характеру волнения и по цвету воды в зонах, которые он разделяет. Он располагается в районе глубин от 20 – 30 м. до 40 – 50 м. В теплоинертной зоне весной обычно бывает гомотермия или обратная стратификация (вода у дна теплее, чем у поверхности), а в теплоактивной – прямая стратификация (вода у поверхности, теплее, чем у дна).

Ладожское озеро

Ладожское озеро принадлежит к бассейну Балтийского моря, расположено на водосборе р. Невы. В административных границах Республики Карелия

находится 40 % акватории. Координаты центра: 61°09' с.ш., 31°20' в.д. Площадь водосбора 258 300 км². Высота над уровнем моря 4.5 м БС. Котловина тектонического генезиса. Общая площадь островов 457 км²(Рис. 5). Основные притоки - реки Свирь, Волхов и Вуокса, исток - р. Нева [1].

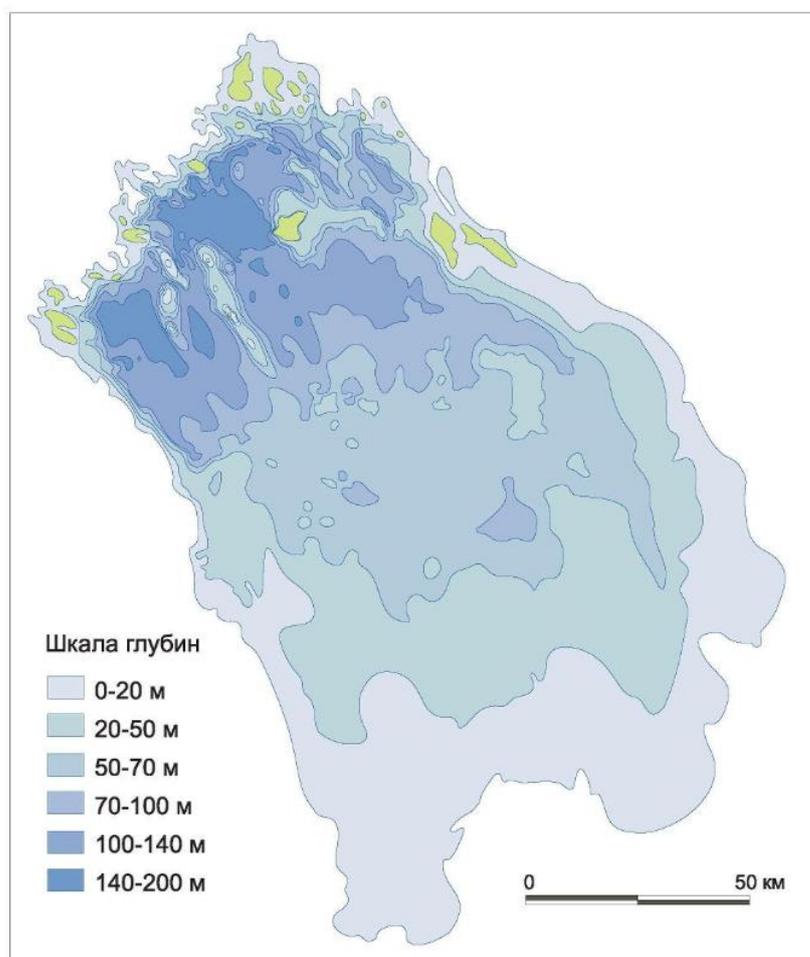


Рис. 5 Карта глубин Ладожского озера[8]

Котловина Ладожского озера тектонического происхождения преобразована воздействием четвертичных ледников. Котловина озера расположена на границе двух крупнейших в Европе геологических структур – Балтийского кристаллического щита и Русской платформы. Различия в геологическом строении водоема определили форму и структуру котловины, гидрологический режим и гидрофизические характеристики водной массы озера. Сложная морфология дна и большие глубины озера, наряду с другими факторами, оказали влияние на первоначальное формирование биоты Ладожского озера. Особенности геологического строения водоема проявляются

в строении и морфологии его берегов. В северо-западной и северной частях озера берега, сложенные кристаллическими породами, высокие и сильно расчлененные. Западное и восточное побережья озера отличаются выровненностью, повсеместным преобладанием отлогих берегов с песчаными пляжами. Южное побережье представляет собой низменную равнину с тремя крупными мелководными заливами: бухта Петрокрепость (средняя глубина 4 м), Волховская губа (средняя глубина 8 м) и Свирская губа (средняя глубина 3 м).

Гидродинамика Ладожского озера является результатом воздействия и взаимодействия большого числа различных процессов и явлений, например неоднородностей полей ветра, плотности воды, силы Кориолиса, топографических эффектов, стока рек и др. Первые представления о течениях в Ладожском озере были получены А. И. Андреевым [9], который по данным косвенных наблюдений предполагал наличие в озере постоянной круговой циркуляции вод и ветровых течений. И. В. Молчанов [11] считал, что течения в озере определяются в основном ветром, а циклональная циркуляция вод наблюдается только при благоприятном ветре. Исследования и инструментальные наблюдения А. Н. Охлопковой [12], измерения течений, выполненные ОГМС «Петрокрепость» в 1967–1976 гг. и Институтом озероведения РАН 1981–1983 гг. (Филатов, [13]) по осреднённым за несколько лет данным инструментальных измерений на автономных буйковых станциях в навигационный период подтвердили тенденцию формирования в озере течений циклонического характера (Рис. 6).

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ТЕЧЕНИЙ ПО СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЮ

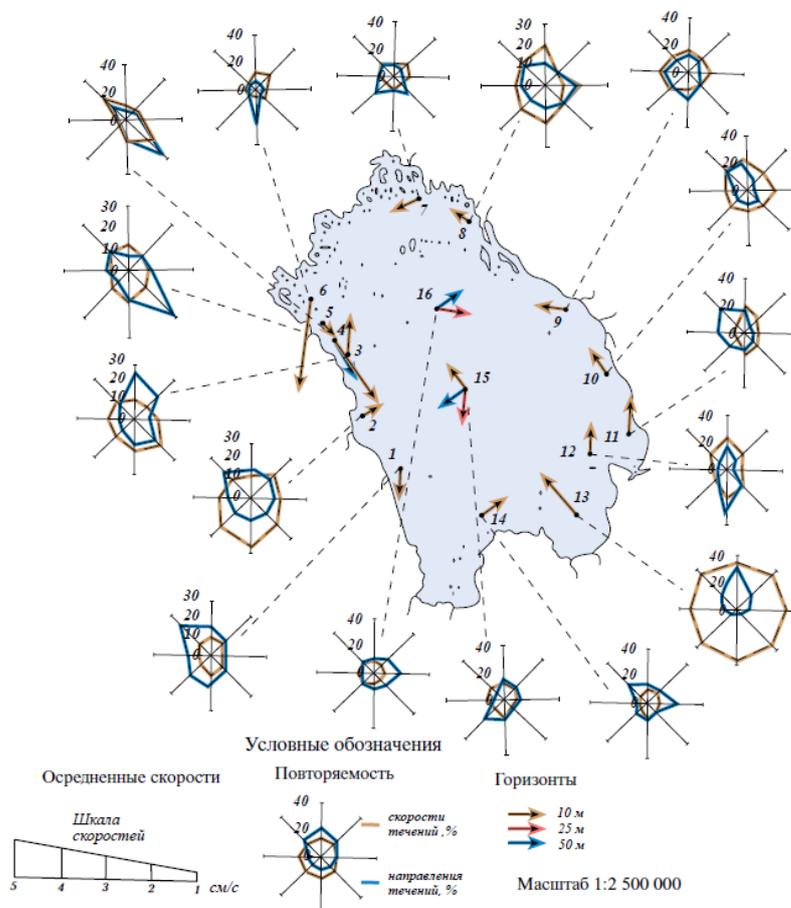


Рис. 6 Повторяемость течений по скорости и направлению в Ладожском озере[8]

На рисунке показана повторяемость направлений и модуля скоростей течений в разных точках озера, на разных горизонтах. Течения, осреднённые за несколько лет, формирующие крупномасштабную циркуляцию вод и охватывающие большую часть акватории.

Течения в Ладожском озере по своему генезису неоднородны и зависят как от сезонных, так и от синоптических факторов (Рис. 7). Весной до выхода фронта термического бара в зону его устойчивого существования движение вод в озере определяется слабо развитой ветровой деятельностью, а речные воды, поступая в озеро, локализуются преимущественно в прибрежной области. Летом циклональная циркуляция становится ведущей по всему озеру и зависит от синоптической ситуации. Осенью с усилением ветровой деятельности и уменьшением горизонтальной неоднородности температуры преобладающими становятся ветровые течения. Изменение направления плотностных течений

играет существенную роль в процессе переноса речных вод в прибрежной части озера. В частности, в осенне-зимний период изменение этого процесса приводит к поступлению вод реки Волхов вдоль южного побережья непосредственно к истоку Невы.

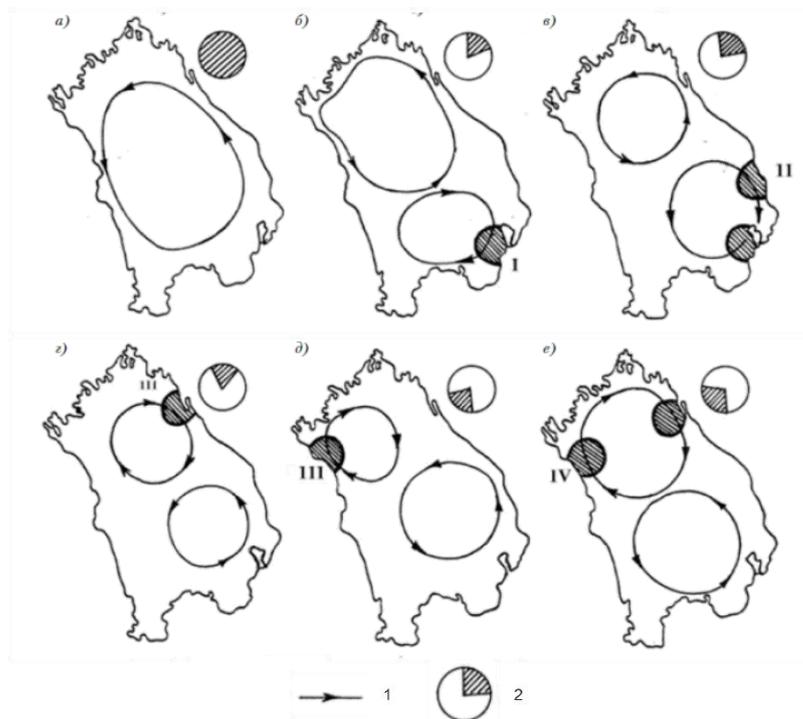


Рис. 7 Схема интегральной циркуляции вод для различных сезонов года
 Пояснения к рисунку: 1-направление циркуляции вод; 2 – направление ветра по данным гидрометеостанций; I - IV – зоны апвеллинга в разные сезоны года; а) Май; б) Июнь-июль; в) Июль-август; г) Август; д) Август-сентябрь; е) Сентябрь-ноябрь.

Ладожское озеро относится к димиктическим[17]. Весенняя фронтальная зона в Ладожском озере существует около двух месяцев – с начала мая до начала июля. В период развитой стратификации водная толща озера по вертикали разделяется на три слоя – на верхний квазиоднородный слой (эпилимнион), придонный с достаточно однородными и низкими температурами (гиполимнион) и расположенный между ними слой скачка (металимнион) с резким вертикальным градиентом характеристик. Наибольших значений средние температуры верхнего слоя воды достигают в августе ($\approx 16\text{ }^{\circ}\text{C}$) и всей водной толщии озера ($\approx 6\text{ }^{\circ}\text{C}$) в сентябре, а наименьших – в середине марта. Озеро полностью покрывается льдом в среднем около 15 февраля, однако один раз в 4-5 лет его центральная часть не замерзает.

Ладожское озеро после вскрытия ото льда (апрель-май) начинает интенсивно нагреваться. Прогрев начинается еще подо льдом, однако основной рост температуры воды происходит в безледный период в связи с увеличивающимся суммарным потоком тепла через поверхность (Тихомиров, [16]). Годовой ход теплосодержания Ладожского озера непосредственно связан с взаимодействием различных климатических и гидрологических факторов в период нагревания и охлаждения озера (Рис. 8). Основные метеорологические факторы, такие как приход солнечной радиации, зависящий от широты места и облачности, и ветровое воздействие, определяют процессы свободной конвекции и заглубления верхнего перемешанного слоя. Гидрологические процессы способствуют возникновению горизонтальных и вертикальных движений в озере.

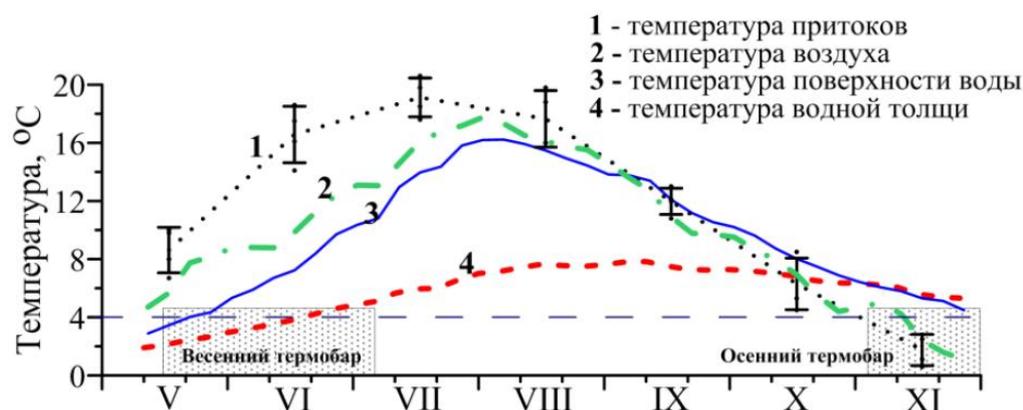


Рис. 8 Среднее декадное распределение температуры поверхности воды, речных притоков, воздуха и водной толщи

1.2. Субмезомасштабные вихри

1.2.1. Понятие о субмезомасштабе

Особенности гидродинамики крупных стратифицированных пресных озер зависят от закономерностей распределения полей температуры воды озер, свойств пресной воды, имеющей максимальную плотность при температуре 3.98 °C, влияния силы Кориолиса и пограничных слоев, которые занимают значительно большую площадь, чем в морях и океанах, а также от физических размеров озер, особенностей морфометрии, географической широты, внешних

воздействий (потока тепла через поверхность, ветрового воздействия, осадков и испарения, речного стока). Условно гидродинамические процессы в озерах можно разделить на несколько групп по их временным и пространственным масштабам (Рис. 9) [18,19,20]:

1. Крупномасштабная циркуляция с временными, которые больше синоптического (от месяца до нескольких лет) и пространственными, охватывающими все озеро или его отдельные части. Такие как течения, которые изменяются медленно и являются апериодическими и внутренние волны, которые периодичны и имеют частоты от локальной частоты Вьяйсяля-Брента (N – несколько мин^{-1}) до параметра Кориолиса (f_c – несколько дней^{-1}). На образование данных процессов активно влияют глобальные движущие силы – вращение Земли вокруг оси и сила Кориолиса.

2. Мезомасштаб представляет собой более устойчивые структуры, в отличие от мелкомасштабных. Пространственные масштабы тонкоструктурных и мезомасштабных процессов частично перекрываются. Вертикальные размеры от нескольких сотен метров до десятка километров, горизонтальные масштабы, на два порядка превышают вертикальные (так же как у тонкоструктурных), примерно в диапазоне 10^2 - 10^4 м. Максимальное время жизни мезоструктур могут составлять от дней до месяца. Минимальный срок жизни не определен и для разных структур он различен. Временной интервал мезомасштабных явлений в океане находится в диапазоне 10^0 - 10^4 часов, так же стоит отметить, что у мезоявлений он может перекрываться с временами жизни тонкоструктурных неоднородностей. Это создает трудности в выделении и анализе соответствующих структур в океане. Нижней границей мезомасштаба являются короткопериодные субмезомасштабные процессы, динамические явления охватывающие верхние слои водоема и характеризующимся радиусом деформации Россби от сотен метров до единиц километров.

Радиус деформации Россби (R_n) – это масштаб длины, имеющий фундаментальное значение в динамике атмосферы и океана. По существу, он

является горизонтальным масштабом, на котором эффекты вращения становятся такими же важными, как и эффекты плавучести [26].

$$R_n = \frac{c_n}{f}, \quad c_n \approx \frac{1}{n\pi} \int_{-H}^0 N(z) dz,$$

где c_n – фазовая скорость n -ой моды волн Россби, f – параметр Кориолиса, H – толщина водного слоя, N – средняя по глубине частота Вейселя-Брента.

3. Мелкомасштабные процессы охватывающие небольшие районы от нескольких десятков метров до километра и небольшие по своей продолжительности от нескольких минут до суток, например турбулентность состоит из процессов (где плавучесть не влияет на движение) с частотами от вязкой частота среза $((\epsilon/\nu)^{1/2}$ – несколько секунд⁻¹) до N (несколько минут⁻¹). Важные временные масштабы в озерах охватывают несколько спектральных окон и соответствуют процессам, варьирующимся от мелкомасштабных до макромасштабных

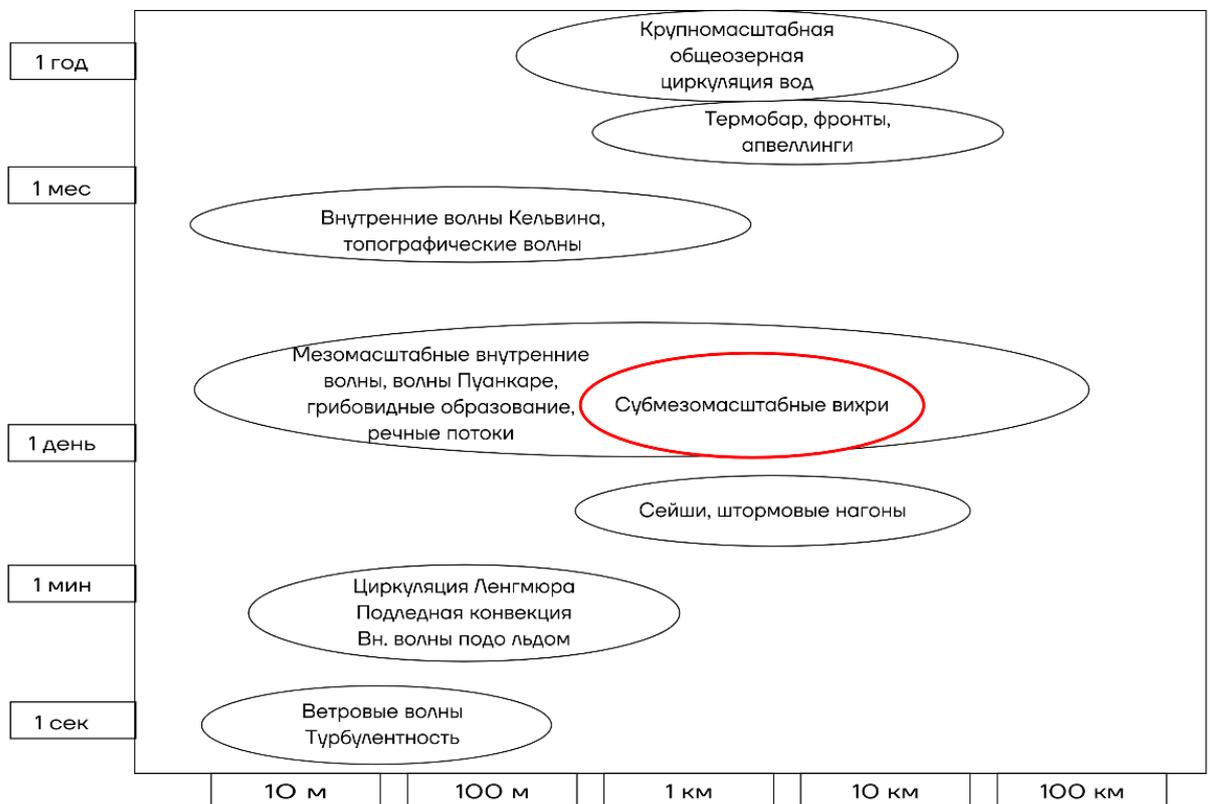


Рис. 9 Пространственно-временные масштабы динамических процессов и явлений в озерах [32]

Субмезомасштабные вихри в озерах – структуры порядка 0.1 – 5 км способные удерживать жидкость и ее свойства в своих центрах, перемещаться в озере и вращаться со скоростью, превышающей скорость перемещения, и сохраняться в течение нескольких дней [Филатов, 21]. Генерироваться субмезомасштабные вихри могут, как в прибрежных районах, так и в открытом озере, например, за счет сдвига ветра или фронтальных меандров. В зависимости от направления вращения вихри могут быть циклоническими (против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном полушарии) или антициклоническими (по часовой стрелке в северном полушарии и против часовой стрелки в южном полушарии).

1.2.2. Субмезомасштабные вихревые структуры в естественных водоемах

Мезо- и субмезомасштабные процессы в морях и озерах (вихревые структуры, внутренние волны, в том числе и нелинейные) в настоящее время являются менее изученными, хоть и вносят значительный вклад (более 50 %) в спектры флуктуаций течений и температуры воды в диапазоне от нескольких месяцев до частоты Вайсяля (N) в океанах, морях и озерах [23,25,31]. Они играют существенную роль в формировании химико-биологических полей, поэтому их исследование представляется актуальным для решения широкого круга экологических задач.

Субмезомасштабные динамические процессы на промежуточном интервале характеризуются числами Россби, Ричардсона и Бюргера порядка единицы и играют важную роль не только в вертикальном обмене из-за значительных вертикальных скоростей, но и в горизонтальном перемешивании вследствие интенсивного вихреобразования (Thomas et al., 2008; Lévy et al., 2012). Размеры субмезомасштабных неоднородностей среды (типично 0.1-5 км) сопоставимы с бароклинным радиусом деформации Россби. Крупные или великие озера, к которым относятся, Ладожское и Онежское, считаются глубокими и стратифицированными, бароклинный радиус деформации Россби для них намного меньше характерных горизонтальных размеров озера (Филатов

и др., 2011) и варьируется в пределах 3 км (Филатов, 2018). Неоднородности характеристик с временными масштабами от десятков минут до суток могут порождаться малыми вихрями и струями, локальной динамикой фронтов и короткопериодными внутренними волнами. Последние обычно рассматриваются как отдельный класс движений со своими механизмами генерации, однако часто они сосуществуют вместе с вихревыми структурами и проявляются на спутниковых радиолокационных снимках схожим образом.

Субмезомасштабные вихревые структуры в Ладоге и Онеге регистрировались по данным отрывочных дистанционных наблюдений [8,5,14]. Например, на приведенном в [8] изображении (7) в видимом диапазоне четко прорисовываются несколько проявлений вихревых структур в прибрежной части Ладожского озера (вблизи истока р. Нева).



Рис. 10 Проявление гидродинамических явлений на поверхности озера по спутниковым данным
Спутниковый снимок Ладожского озера 10 IX 1979 г. (разрешение 70 м, видимый и ИК диап.)

Имеющиеся оценки бароклинного радиуса Россби [31], для Онежского и Ладожского озер указывают только на их характерные размеры(Таб. 1) .

Таб. 1 Характерные размеры исследуемых озер и оценки фазовой скорости и радиуса деформации Россби

Озеро	Размеры, км ²	Средняя глубина, м	Фазовая скорость и радиус деформации Россби			
			баротропная		бароклинная	
			С _ф , м/с	R _б , км	С _ф , м/с	R _б , км
Ладожское	200*100	51	22	220	0.16	2-5
Онежское	100*30	30	18	180	0.14	2-4

На акватории Ладожского и Онежского озер неоднократно в теплый период отмечались поверхностные проявления субмезомасштабных вихрей с диаметром от сотен метров до 5 км.

1.3. Обзор существующих методов регистрации проявлений субмезомасштабных вихрей

1.3.1. Контактные методы

Мы можем разделить методы и приборы, используемые при мезомасштабных измерениях, на две категории: контактные и дистанционные. Контактные исследования можно проводить как с борта судна, так и автономными зондами. Наиболее передовыми из них являются использование дрейфующих буйев и глайдеров.

Поверхностные дрифтеры

Надводные дрифтеры (Рис. 11) представляют собой буй с парусом, который находится на глубине около 15 метров. Эти буи пассивно следуют за горизонтальным потоком на поверхности. Буй оснащен спутниковым передатчиком и электронными устройствами для измерения давления воздуха и температуры поверхности моря.

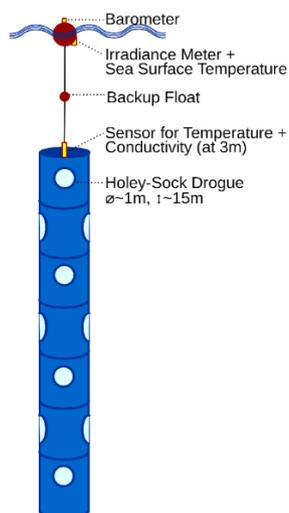


Рис. 11 Поверхностный дрейфующий буй

Глайдеры и беспилотные подводные аппараты

Автономные подводные аппараты (Рис. 12) — это самоходные устройства (приводимые в движение изменением плавучести и крыльями), которые перемещаются под водой с частыми подъемами и спусками. Они программируются перед выпуском для отбора проб по определенному пути, а также могут приводиться в действие удаленно с помощью спутниковой связи во время подъема на поверхность. Планеры оснащены датчиками STD (проводимости, температуры и давления), а также биогеохимическими и оптическими датчиками.

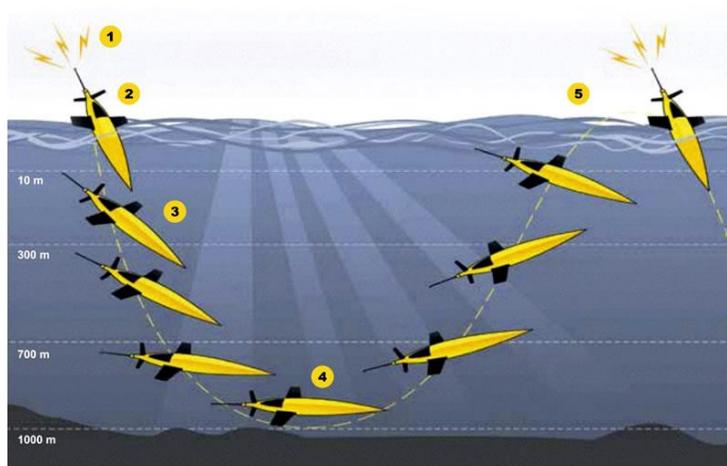


Рис. 12 Траектория движения глайдера, автономного подводного аппарата

Пояснения к рисунку: 1. Телеметрия осуществляется с помощью спутниковой связи; 2. GPS используется для определения местоположения во время всплытия; 3. Находясь под водой, автомобиль ориентируется с помощью 3-осевого компаса, датчика давления и высотомера; 4. Глайдер погружается на максимальную глубину 1000 метров, собирая различные океанские данные; 5. После погружения данные передаются обратно на базовую станцию и загружаются новые инструкции

1.3.2. Дистанционные методы

Спутниковые наблюдения. Данные спутниковых наблюдений в различных диапазонах в последние несколько десятилетий являются основным способом изучения субмезомасштабных вихрей в различных районах Мирового океана [23,25,29,35]

Оптический и ИК диапазон.

Пассивные методы спутниковой океанологии основаны на регистрировании сигнала, излучаемого или отраженного объектом либо прилегающей территорией. Отраженный солнечный свет — наиболее часто используемый источник излучения, регистрируемый пассивными сенсорами. Примерами пассивного дистанционного зондирования являются цифровая и пленочная фотография, применение инфракрасных (ИК) приборов и радиометров.

Проявления вихревых структур в видимом оптическом диапазоне (Рис. 13) реализуются за счет трассеров, например, поверхностных пленок, так как «сигнал, регистрируемый датчиками в оптическом диапазоне, определяется рассеянием на гидрозоле (фитопланктоне и взвешенных минеральных частицах), а также отраженным от поверхности солнечным излучением (наиболее сильно проявляющимися в зоне солнечного блика). Гидрозоли можно рассматривать как пассивные трассеры поверхностных течений» [36], благодаря которым вихри могут проявляться как спиралевидные структуры либо пятна вод разной контрастности.



Рис. 13 Определение вихревых структур в видимом диапазоне по цветению фитопланктона в Атлантическом океане

В данных инфракрасного (ИК) диапазона, в которых находит свое отражение температура поверхности моря (ТПМ), вихревые структуры имеют свои проявления преимущественно в виде пятен более холодных или теплых вод по сравнению с окружающей жидкостью (Рис. 14).

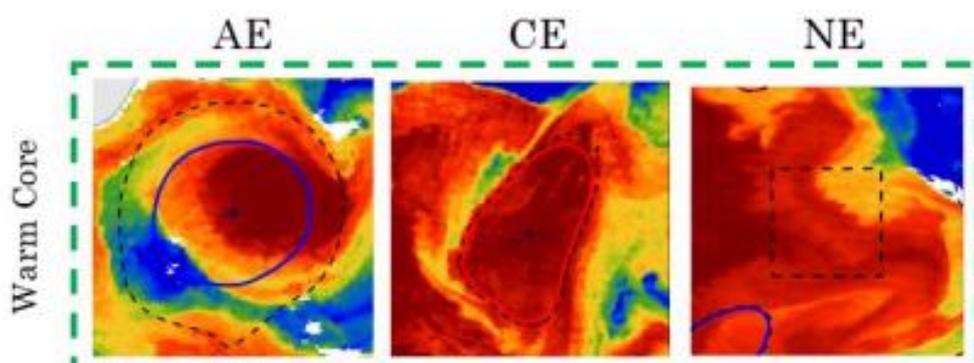


Рис. 14 Образцы изображений SST, нанесенных вместе с контурами AMEDA (Алгоритм обнаружения и отслеживания вихревого момента импульса, [38]) Столбцы представляют три класса. Антициклонический вихри (AE), циклонический вихри (CE) или отсутствие вихревой сигнатуры (NE). [33]

Радиолокационный диапазон.

Радар с синтезированной апертурой (Synthetic-aperture radar, далее – SAR) часто используется для обнаружения особенностей поверхности океана в

условиях слабого ветра [34]. Основными преимуществами изображений SAR являются: (1) съемка ведется днем и ночью при любых погодных условиях, (2) обладает высокой чувствительностью к мелкомасштабной изменчивости водной поверхности и (3) обеспечивает высокое разрешение изображений. Закономерности, наблюдаемые на изображениях SAR, обусловлены изменением шероховатости водной поверхности, на которую влияют взаимодействия волн и течений, естественные поверхностные пленки и пространственные вариации поля локального ветра.

Вихри в безледный период года проявляются на снимках SAR благодаря двум основным механизмам, а именно накоплению поверхностно-активных веществ и взаимодействию волны и течения [35]. При низких или умеренных скоростях ветра (3-5 м/с) первый является основным механизмом, и на снимках SAR обычно появляются вихри из-за наличия естественных пленок на поверхности моря (Espedal et al., 1998). Поверхностно-активные вещества гасят мелкомасштабные поверхностные волны, тем самым уменьшая обратное рассеяние радара от поверхности моря (Alpers and Hühnerfuss 1989), и они часто накапливаются вдоль линий сдвига и зон конвергенции, которые, в свою очередь, связаны со спиральным течением (Eldevik and Dysthe 2002). Таким образом, вихри становятся видимыми на снимках SAR (Gade et al., 2013). Поскольку этот эффект приводит к тому, что вихри обозначаются как темные, для краткости вихри, визуализируемые из-за пятен, далее называются “черными” вихрями (Рис. 15).

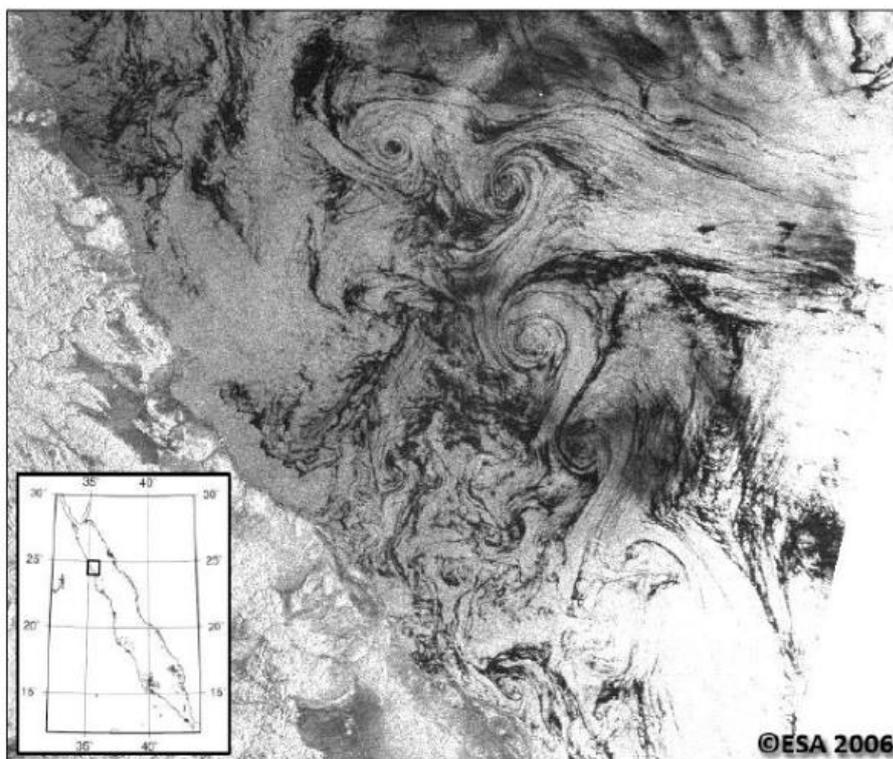


Рис. 15 Проявление “черных” вихрей на изображении Envisat ASAR WS, полученном 29 июня 2006 года в 07:42 UTC над северо-западным побережьем Красного моря, к северу от мыса Банас. Размеры показанной области составляют 130 км × 95 км.

2. Материалы и методы

2.1. Исходные данные

В качестве исходных данных использовались радиолокационные изображения (далее – РЛИ) Sentinel-1A/B в режимах съёмки IW (Interferometric Wide) и EW (Extra Wide) и с разрешением 20 и 90 м соответственно в безледные периоды с 1 мая по 31 октября 2021 и 2022 гг. Изображения были получены с сайта Alaska Satellite Facility. Количество снимков, полученных по полигонам Ладожского и Онежского за два изучаемых года составило 626 РЛИ (436 – 2021г; 189 – 2022 г.). Малое количество снимков в 2022 г. связано с прекращением работы одного из спутников – Sentinel-1B к 2022 году [37].

Для настоящего исследования данные SAR в С-диапазоне были получены со спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B Европейского космического агентства (ESA). Использовались ко-поляризованные данные VV (вертикальная передаваемая и вертикальная принимаемая поляризация SAR), поскольку шум ограничивает применение данных VH (вертикальная передаваемая и горизонтальная принимаемая поляризация SAR) (Gao et al., 2019). Пространственное разрешение данных SAR варьируется от 5 до 20 м.

2.2. Методы исследования

Метод обнаружения вихрей на снимках Sentinel-1 SAR основан на визуальной идентификации, методика «экспертной оценки» [39], их поверхностных проявлениях с использованием программного обеспечения ESA SNAP Software с открытым исходным кодом.

Каждое изображение SAR было визуально проверено на наличие отчетливых признаков проявления вихрей и идентификации их границ. После определения границ вихрей вручную определялось их местоположение и знак завихренности (циклон/антициклон). Среднее значение двух квазиперпендикулярных участков поперек центра вихря было принято за средний диаметр вихря.

Метод «экспертной» оценки вихревых структур по данным РЛИ [39]

1. Открытие РЛИ с использованием программного обеспечения ESA SNAP Software.
2. Настройка контрастности изображения для наилучшей интерпретации изображения для поиска вихревых структур.
3. На снимке при их наличии определялись структуры виде линий, закрученный в спирали или дуги, иногда похоже на грибовидные структуры. Найденная структура принимается за проявление вихря ее можно вписать в эллипс.
4. Далее определяется направление закрученности вихря, для северного полушария – циклоническая (против часовой) или антициклонический (по часовой). Важно иметь виду что из-за особенностей отображения РЛИ в программе SNAP закрученность определяется наоборот: по часовой – циклонический, а против часовой – антициклонический вихрь.
5. После наносятся диаметры вихря, проводятся два перпендикулярных друг к другу разреза (трансекты) от одной границы до другой, и сохраняются в формате txt с обозначениями направления завихренности (С-циклон., А-антициклон.), порядковым номером вихря на снимке и номером разреза для данного вихря. (Рис. 16)
6. После обработки всех изображений и сохранения всех трансект, с помощью программного обеспечения на базе MATLAB рассчитываются координаты центров вихрей и их диаметры.

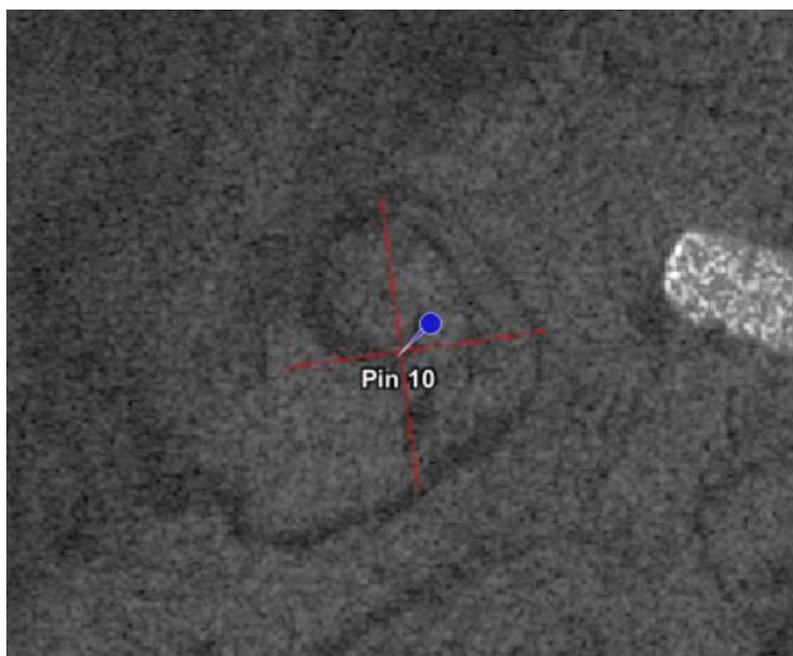


Рис. 16 Пример проявления вихря на РЛИ

Анализ данных SAR проводился с использованием программного обеспечения на базе MATLAB, рассчитывались параметры покрытия озер снимками, количество вихрей циклонического и антициклонического типа, их размеры, карта частоты встречаемости вихрей. По этим данным отрисованы пространственно-временные карты отдельно для каждого из озер.

Согласно бароклинному радиусу деформации Россби для Онежского и Ладожского озер (Филатов, 31) на снимках для обоих водоемов будут учитываться субмезомасштабные вихревые структуры от 0.25 км до 3 км.

По полученным данным рассчитываются первичные статистики – средние и минимальные-максимальные значения диаметров, частота возникновения вихрей определенных диаметров.

3. Пространственно-временная изменчивость характеристик субмезомасштабных вихрей в крупных стратифицированных озерах

Статистические характеристики зарегистрированных проявлений вихревых структур представлены в Таб. 2. В зависимости от типа все образования разделены на циклоны (С) и антициклоны (А). В 2021 г. преобладало количество циклонических вихрей. Больше всего вихрей в озерах приходится на июль и сентябрь.

Таб. 2 Характеристики проявления вихрей в Онежском и Ладожском озерах по данным спутниковых радиолокационных измерениях

Озеро	Количество, шт.				Диаметр (min-max), км		
	Год	С	Ас	All	С	Ас	All
Онега	2021	23	7	30	2.3(0.4-4.4)	1.6(1-2.4)	2.2
	2022	2	1	3	2.9(1.5-4.3)	1.2	2.3
	Всего	25	8	33	2.6	1.4	2.2
Ладога	2021	141	37	178	1.8 (0.3-5)	1.5(0.4-4.6)	1.7
	2022	53	11	64	1.1(0.3-3.5)	1.3(0.4-2.3)	1.2
	Всего	194	48	242	1.5	1.4	1.4

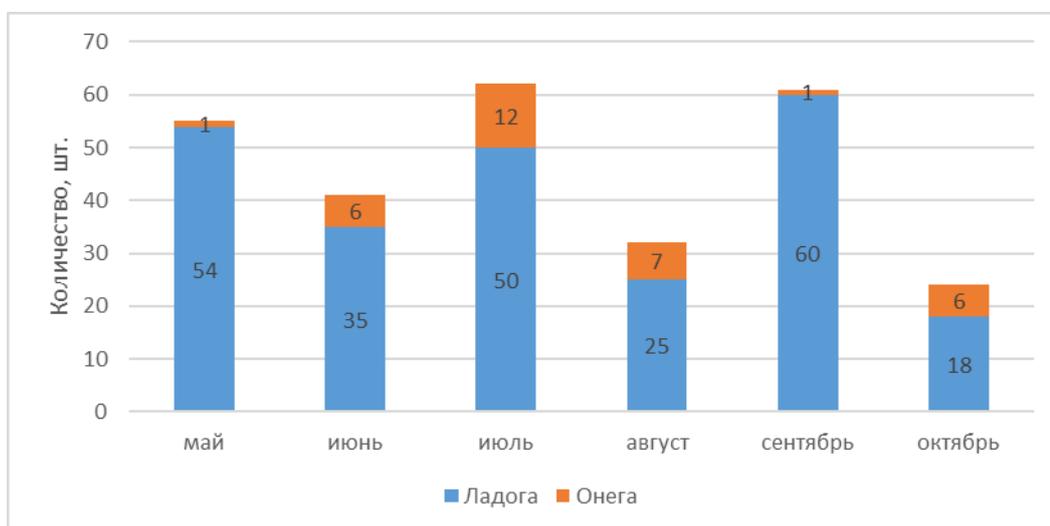


Рис. 17 Проявления вихревых структур по месяцам в Онежском и Ладожском озерах

3.1. Онежское озеро

Покрытие снимками Онежского озера достаточно мало по сравнению с количеством снимков Ладожского озера, причиной этому служат несколько

факторов: малые размеры самого водоема, траектория прохождения спутников Sentinel 1A/B, отрывочный характер наблюдения за акваторией озера

Максимальное количество покрытия снимками Онежского озера в 2021 г. составило 97 штук, в основном сосредоточенных в северной части водоема, в Повенецком заливе (Рис. 18 (а)). В 2022 г. снимков уже гораздо меньше, максимум 45, в среднем 30 снимков, перекрывающих большую часть в западной части озера (Рис. 18 (б)). Суммарно за два года максимальное покрытие составило 127 РЛИ (Рис. 18 (в)).

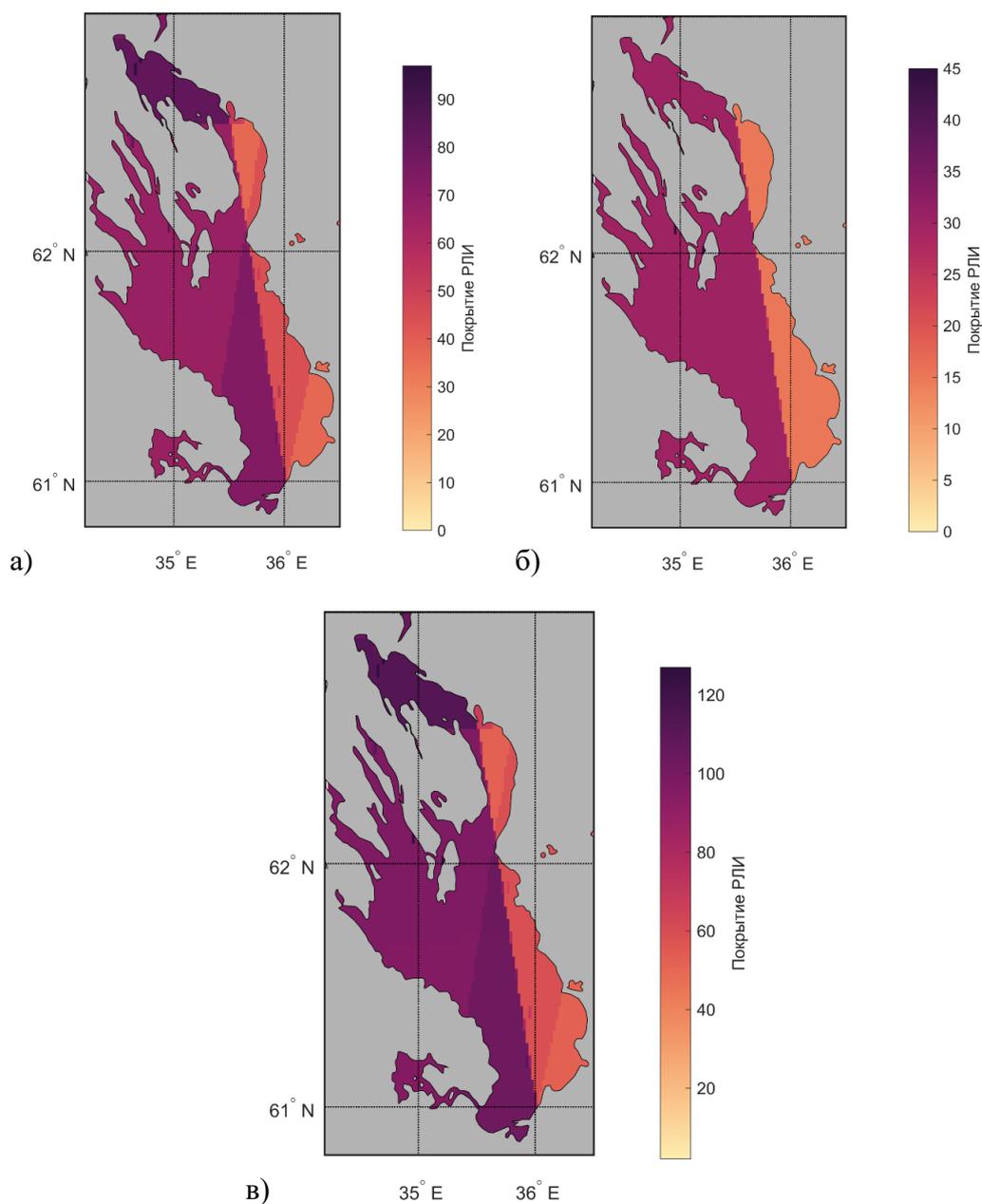


Рис. 18 Карты покрытия РЛИ Онежского озера за безледный период (май-октябрь): а) 2021 г. ; б) 2022 г.; в) 2021-2022 гг. , шкала в шт.

В Онежском озере вихри отмечаются в восточной части в центральной части ближе к западному берегу, 3 вихря отмечено в Повенецком заливе на севере водоема. В 2021 году циклонических вихрей было 77% со средним диаметром 2.3 км, антициклонических - 23% со средним диаметром 1.6 км. В 2022 отмечено два циклонических вихря со средним диаметром 2.9 км. и один антициклонических диаметром 1.2 км.

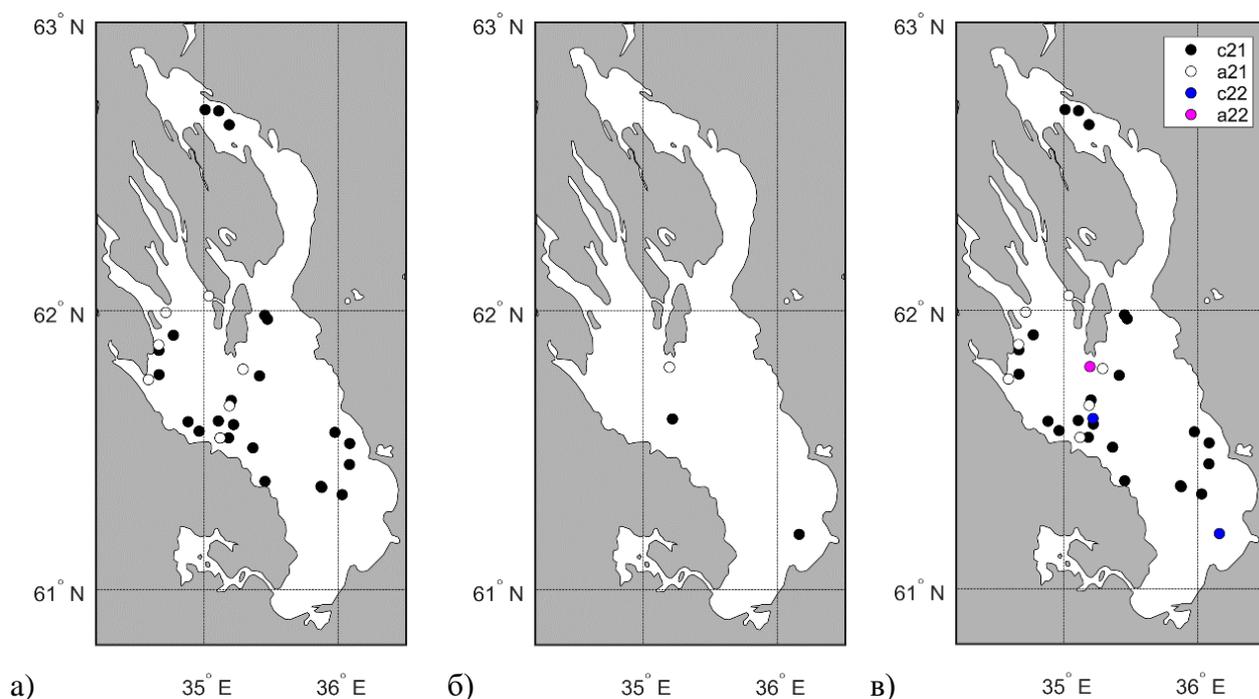


Рис. 19 Местоположение циклонических(черные, с21, с22) и антициклонических(белые, а21, а22) вихрей по данным РЛИ в Онежском озере за: а) 2021 г. ; б) 2022 г.; в) 2021-2022 гг.

Согласно работе в качестве границы субмезомасштаба были выбраны диаметры структур от 0.03 км до 3 км. Согласно этому критерию к субмезомасштабу относятся 75% вихрей, в основном преобладали вихри обоих типов закрученности размерами от 1-2 км (

Рис. 20).

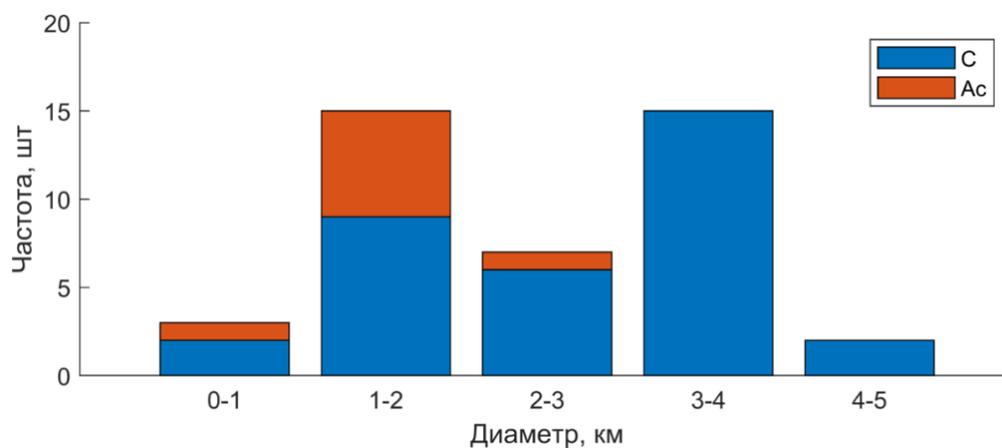


Рис. 20 Гистограммы распределения диаметров вихрей в Онежском озере

За два года вихри диаметров до 3 км в основном встречаются у берегов в западной части озера, в центральной и восточной встречаются вихри 4-5 км (Рис. 21 (в)).

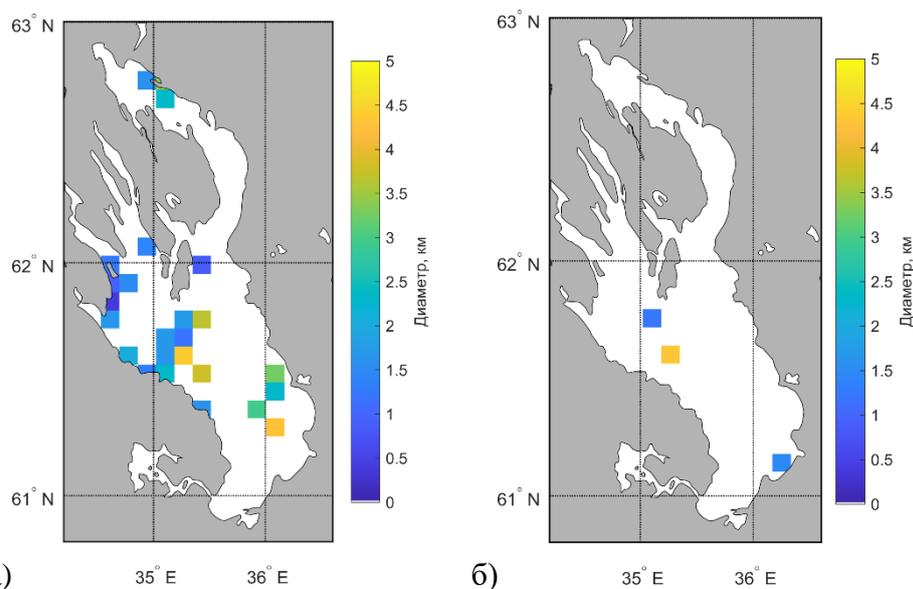
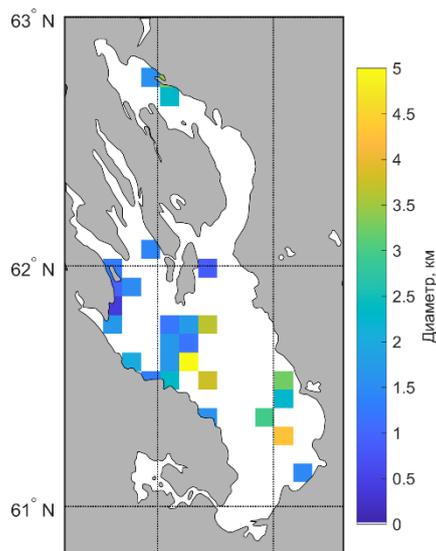


Рис. 21 Диаметры вихревых структур в Онежского озера за а) 2021 г. ; б) 2022 г.; в) 2021-2022 гг. Пространственное распределение диаметров поверхностных проявлений, осредненных на единицу сетки (~ 74 км²)



в) Продолжение Рис. 21

Для количественной оценки регистрации вихрей на РЛИ была посчитана относительная частота встречаемости (Рис. 22) (безразмерный показатель, отражающий долю вихрей на РЛИ и равен отношению количества вихрей к количеству РЛИ на единицу сетки $\sim 74 \text{ км}^2$). В 2021 средняя частота проявлений вихревых структур на снимка составляла 0.015 что говорит о проявлении вихревых структур примерно на каждом 67 снимке. В 2022 году было малое количество РЛИ и отмеченных вихрей для того, чтобы как-то анализировать частоту встречаемости за этот год.

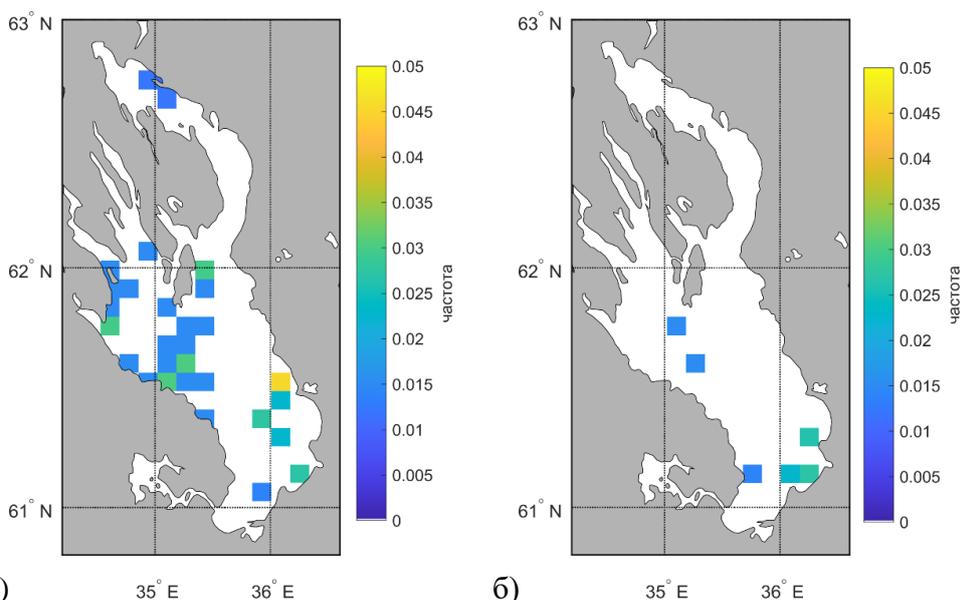


Рис. 22 Относительная частота встречаемости вихрей на РЛИ в условных единицах в Онежском озере за а) 2021 г. ; б) 2022 г. на единицу сетки ($\sim 74 \text{ км}^2$)

Пик вихревой активности в Онежском озере при анализе всех данных за два года пришелся на июль (Рис. 23). В этом месяце за оба года было зарегистрировано 36 % всех вихревых структур. В целом вихревая активность увеличивалась с мая по июль, затем уменьшалась к сентябрю, потом количество снова увеличилось в октябре.

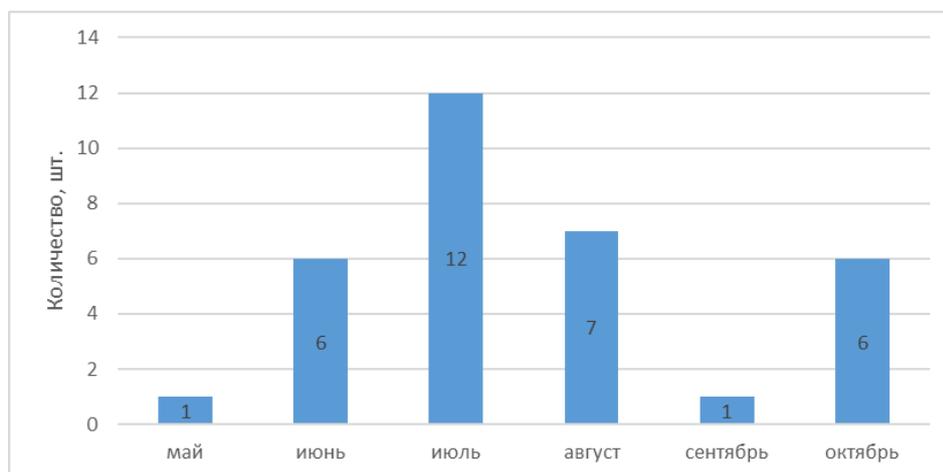


Рис. 23 Внутрисезонное распределение количества вихрей в Онежском озере

Предположительно столь неравномерное распределение структур в пространстве и времени связано с неустойчивостью направлений ветра и циркуляции вод в течении года.

3.2. Ладожское озеро

Максимальное количество покрытия снимками Онежского озера в 2021 г. составило 140 штук, в основном сосредоточенных в центральной части водоема, между 31° и 32° в.д. (Рис. 24 (а)). В 2022 г. снимков в два раза меньше, максимум 76, также сосредоточенной в центральной части озера части озера (Рис. 24 (б)). Суммарно за два года максимальное покрытие составило 214 РЛИ (Рис. 24 (в)).

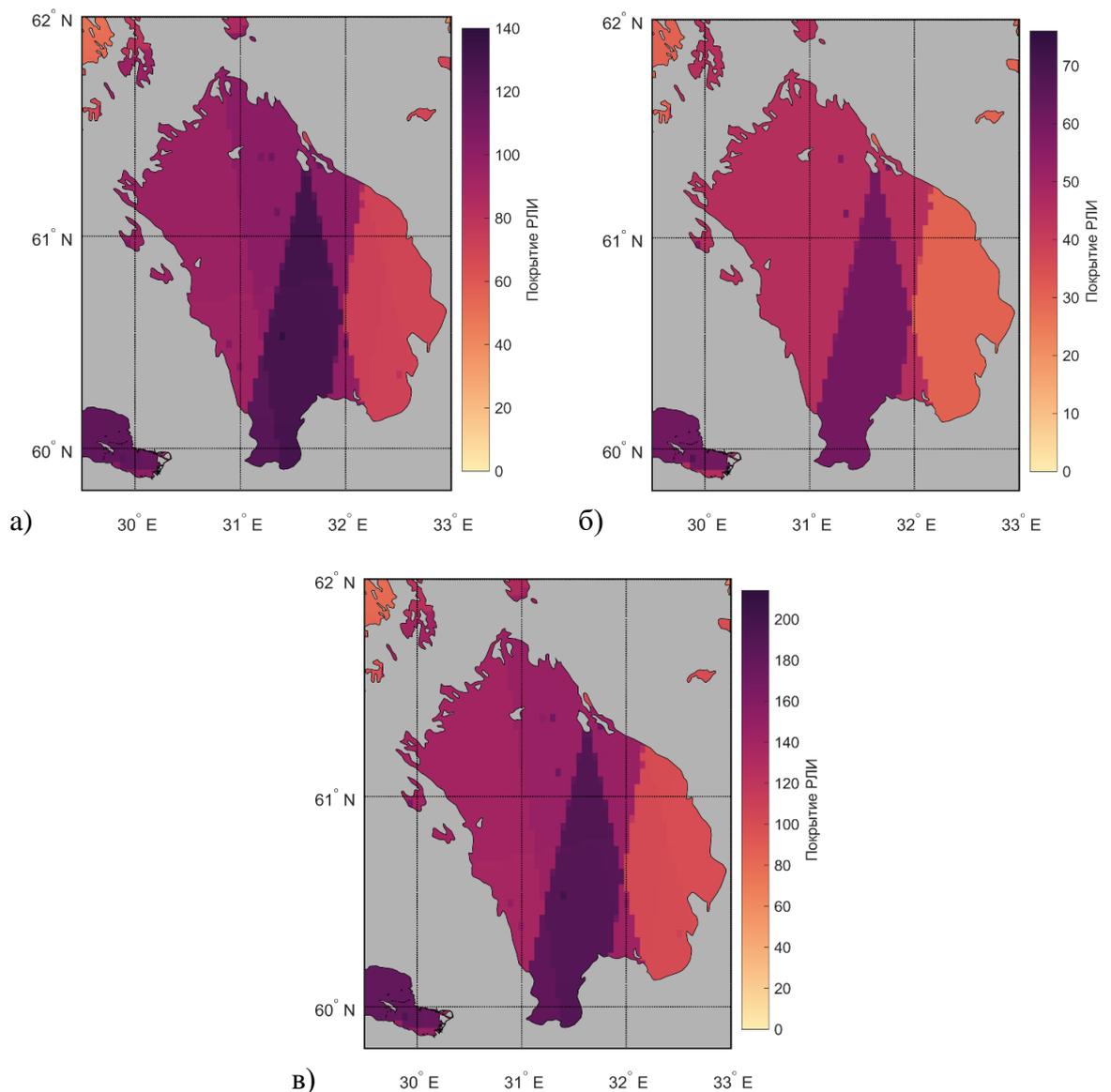


Рис. 24 Карты покрытия РЛИ Ладожском озере за безледный период (май-октябрь): а) 2021 г. ; б) 2022 г.; в) 2021-2022 гг. , шкала в шт.

В Ладожском озере вихри отмечались преимущественно в центральной, северной и восточной частях водоема. В 2021 году преобладали вихри циклонического вида (79%), со средним диаметром 1.8 км. Антициклонические вихри составляют 21% от общего числа, средний диаметр – 1.5 км. В 2022 г. зафиксировано 53 циклонических вихря и 11 антициклонических со средними диаметрами 1.1 и 1.3 км соответственно.

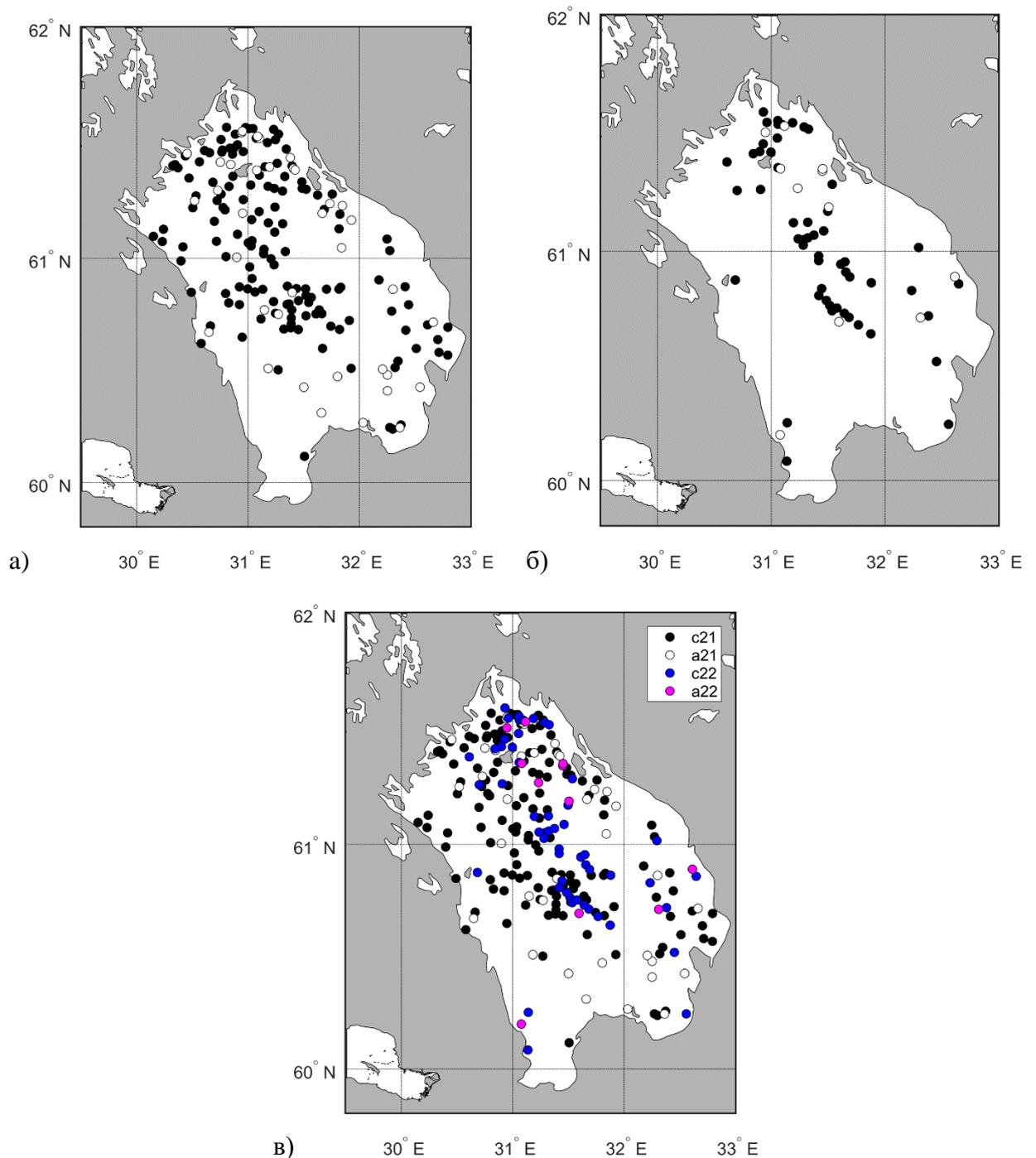


Рис. 25 Местоположение циклонических(черные, с21, с22) и антициклонических(белые, а21, а22) вихрей по данным РЛИ в Ладожском озере за: а) 2021 г. ; б) 2022 г.; в) 2021-2022 гг.

Согласно работе в качестве границы субмезомасштаба были выбраны диаметры структур от 0.3 км до 3 км. Согласно этому критерию к субмезомасштабу относятся 90% вихрей, зафиксированных в озере, в основном преобладали вихри циклонического типа закрученности размерами от 0.3-2 км (Рис. 26).

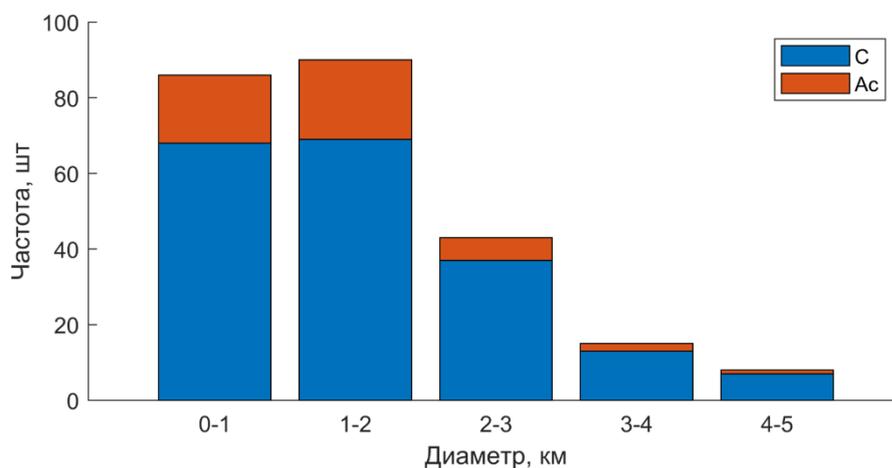


Рис. 26 Гистограммы распределения диаметров вихрей в Ладожском озере

В 2021 г. вихри диаметров до 2 км в основном встречаются у берегов в северо-западной части озера, в центральной и восточной встречаются вихри 4-5 км (Рис. 27 (а)). В 2022 г. вихри в основном проявлялись в северной и центральной частях с диаметрами от 0 до 2 км.

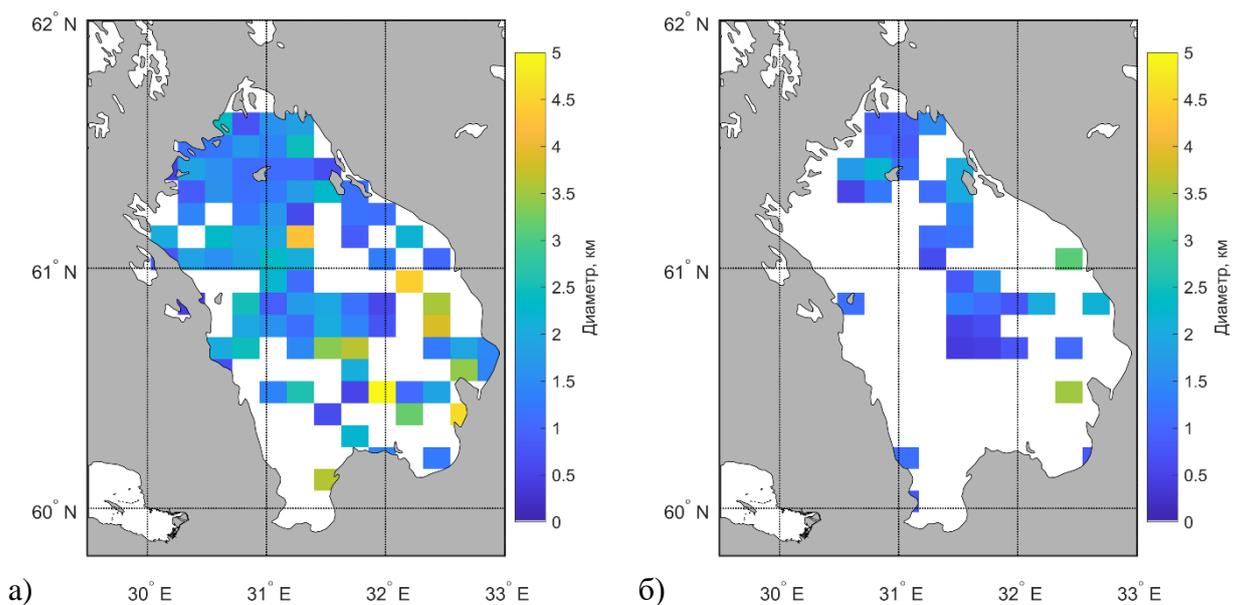
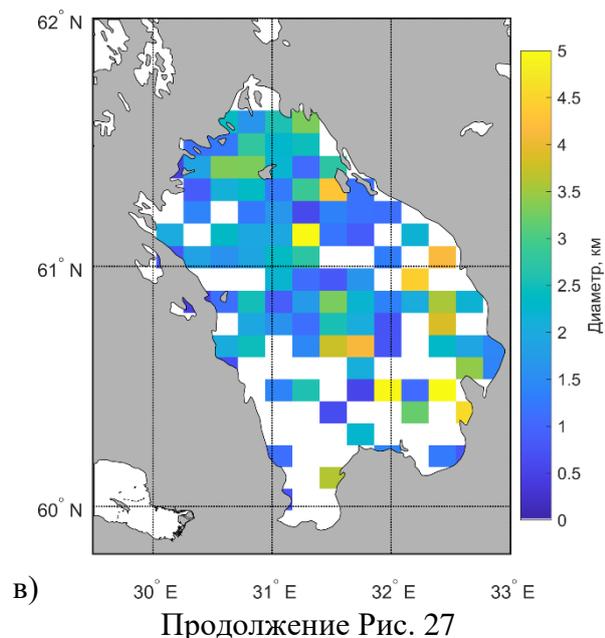


Рис. 27 Диаметры вихревых структур в Ладожского озера за а) 2021 г. ; б) 2022 г.; в) 2021-2022 гг. Пространственное распределение диаметров поверхностных проявлений, осредненных на единицу сетки (~ 74 км²)



Для количественной оценки регистрации вихрей на РЛИ была посчитана относительная частота встречаемости (Рис. 28) (безразмерный показатель, отражающий долю вихрей на РЛИ и равен отношению количества вихрей к количеству РЛИ на единицу сетки $\sim 74 \text{ км}^2$). В 2021 средняя частота проявлений вихревых структур на снимка составляла 0.03 что говорит о проявлении вихревых структур примерно на каждом 30 снимке. В центральной и северной частях озера вихри встречаются с частотой 0.08 (каждый 13 РЛИ) и 0.065 (каждый 15 РЛИ) соответственно. В 2022 году вихри проявлялись в северо-восточной, центральной и немного восточной частях озера со средней частотой 0.025 или на каждом 40 снимке.

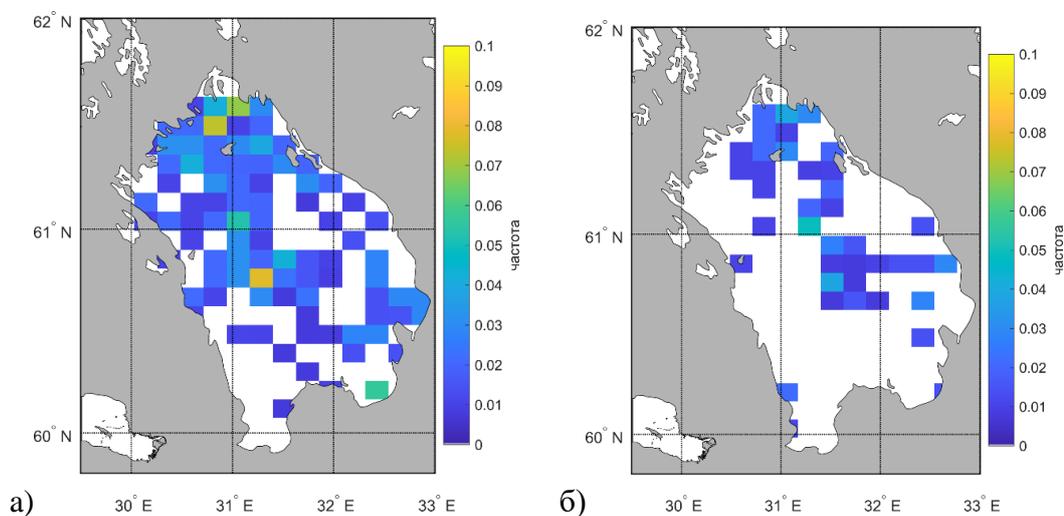


Рис. 28 Относительная частота встречаемости вихрей на РЛИ в условных единицах в Ладожском озере за а) 2021 г.; б) 2022 г. на единицу сетки ($\sim 74 \text{ км}^2$)

Пик вихревой активности в Ладожском озере при анализе всех данных за два года пришелся на сентябрь (Рис. 29). В этом месяце за оба года было зарегистрировано 25 % всех вихревых структур. В целом вихревая активность имеет неравномерное распределение. По результатам обработанных РЛИ существует несколько месяцев с повышенной вихревой активностью – май, июль и сентябрь. На май и сентябрь приходятся явления весеннего и осеннего термобаров, создающие термическую фронтальную зоны на периферии которой могут возникать вихри.

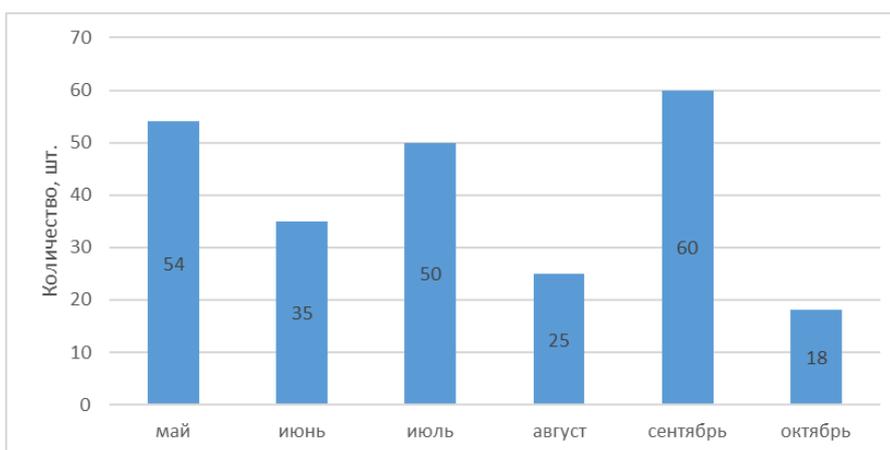


Рис. 29 Внутрисезонное распределение количества вихрей в Ладожском озере

Предположительно столь неравномерное распределение структур в пространстве и времени связано с неустойчивостью направлений ветра и циркуляции вод в течении года, а также из-за расположения термобара.

Заключение

Был проведен литературный обзор по субмезомасштабным вихрям и их проявлениях в крупных стратифицированных озерах по типу Онежского и Ладожского. Определены границы субмезомасштаба для анализа данных, полученных по результатам обработки около 625 снимков для обоих озер.

Анализ РЛИ за два года показал, что в Онежском озере зафиксировано 33 вихря, а в Ладожском – 242 вихря. Как следствие этого можно сделать вывод, что субмезомасштабные вихри не редкое явление, однако вероятность их обнаружения резко снижается при уменьшении частоты покрытия снимками исследуемых акваторий, что особо проявилось в Онежском озере, где в 2021 г. средняя частота проявления вихревых структур была примерно на каждом 67 снимке. Для Ладожского частота проявления больше, в среднем на каждом 35 снимке.

По результатам статистической обработки данных к выбранной нами границе субмезомасштаба (до 3 км) относятся около 89 % всех обнаруженных на РЛИ вихревых структур. Их средний диаметр для обоих озер составил 1.8 км. Среди вихрей отмечалось значительное преобладание циклоническим типом вращения (~80 %) с диаметрами от 0.3 км до 3 км (~67 %).

По построенным картам распределения вихревых структур для Онежского озера проявления вихрей сосредоточенно в центральной и западной частях водоема со средним диаметром 2.2 км. В Ладожском вихри были детектированы в северо-западной, в центральной и в восточной частях озера со средним диаметром 1.4 км.

Сезонный ход для Онежского озера в рамках одного года прослеживается, но из-за того, что основное количество вихрей приходится на 2021 г. сложно утверждать, что в другие года от будет повторяться. В Ладожском распределение не похоже на нормальное и сезонный ход сложно определить, хотя и есть пики роста количества вихрей, соответствующих явлению термобара весной и осенью.

Предположительно основные механизмы генерации вихрей в озерах связаны с воздействием неоднородных полей ветра над водоемом, общим сезонным ходом циркуляции вод, а также образование термической фронтальной зоны, проявляющейся при термобаре. К причинам возникновения в Онежском озере можно отнести влияние ветра и сезонной циркуляции, в Ладожском – ветер, сезонную циркуляцию и термобар.

На данный момент не хватает данных для более точного определения причин генерации субмезомасштабных вихревых структур, поэтому дальнейшая работа будет направлена на их выявление для этих двух географически близких озер.

Список литературы

1. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Том.1. Гидрофизика М. МГУ. Физический факультет. 2002., 276 с.
2. Микаэлян А.С., Зацепин А.Г., Кубряков А.А. Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2020. №6 (216). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-mezomasshtabnoy-vihrevoy-dinamiki-na-bioproduktivnost-morskih-ekosistem-obzor>
3. Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddying Regime / Eds. M.W. Hecht, H. Hasumi. Geophys. Monogr.Ser. 2008. V. 177. P. 17–38. doi: 10.1029/177GM04.
4. Озера Карелии [Электронный ресурс] : справочник / ВОО "Рус. геогр. о-во", отделение РГО в Респ. Карелии, Ин-т вод. проблем Севера КарНЦ РАН. - Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2013 (2015). - 463 с., [4] л. цв. ил.
5. Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с
6. Онего / Б. Б. Богословский, Ю. М. Георгиевский. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1969. - 119 с. : ил.; 16 см.
7. Ладога: [монография] / В. А. Румянцев и др. ; под ред. В. А Румянцева, С. А. Кондратьева ; Российская акад. наук, Ин-т озёроведения. - Санкт-Петербург : Нестор-История, 2013. 467 с.
8. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / ред. В.А. Румянцев. — СПб. : Нестор-История, 2015. — 200 с.
9. Андреев А. П. Ладожское озеро. Ч.1–2. СПб.1875
10. Witting Rolf. Beobachtungen in Ladogasee in den Jahren 1898–1903. Inst. Meeresforschung, Sch. Nr. 60, Helsinki, 1929.
11. Молчанов И. В . Ладожское озеро. М.; Л.,1945. 557с.

12. Охлопкова А. Н. Течения Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. — Л.: Изд — во ЛГУ, 1966. С.247–265.
13. Филатов Н. Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 166 с.
14. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Том 1. Гидрофизика
15. Блохина, Н. С. Уникальное природное явление - термобар / Н. С. Блохина, К. В. Показеев // Земля и Вселенная. – 2015. – № 6. – С. 78-88. – EDN VCGZVT.
16. Термика крупных озер / А. И. Тихомиров. - Ленинград : Наука : Ленингр. отделение, 1982. - 232 с. : ил.; 21 см.
17. Jr, William. (2011). A Revised Classification of Lakes Based on Mixing. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 40. 1779-1787. 10.1139/f83-207.
18. Изменчивость Мирового океана / А. С. Монин, В. М. Каменкович, В. Г. Корт. - Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. - 262 с. : черт., карт.; 22 см.
19. Филатов, Н. Н. Проблемы оценки изменений экосистем крупных стратифицированных водоемов под влиянием климата и антропогенных факторов / Н. Н. Филатов, В. В. Меншуткин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 48. – С. 120-147. – EDN ZWUOOT.
20. Papadimitrakis, I. (2011). Temporal and spatial scales of lake processes. Part 1: Physical and ecological scales, non-dimensional parameters and flow regimes. Global Nest Journal. 13.
21. Филатов Н. Н. Гидродинамика озер. СПб.: Наука, 1991. 196 с.
22. Загадочные циркуляции / С. В. Рянжин, Н. В. Кочков, Л. Н. Карлин // Природа. - 2008. - № 4. - С. 16-23. - Библиогр.: 10 назв. - Из содерж.: Ветровые полосы и поперечные циркуляции ; Эксперименты Ленгмюра и теоретические исследования ; Измерение поперечных размеров ленгмюровских ячеек.

23. Кошляков М.Н., Белокопытов В.Н. Синоптические вихри открытого океана: обзор экспериментальных исследований. Морской гидрофизический журнал. 2020;36(6):613-627. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-613-627>
24. Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С. Синоптические вихри в океане. 2-е издание. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 510 с.
25. Eddies in Marine Science / Ed. A. R. Robison. Berlin, Heidelberg: Springer, 1983. 609 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69003-7>
26. Gill, A. E., 1982: Atmosphere-Ocean Dynamics, Academic Press, Orlando, 662 pp.
27. Белоненко Т.В., Кубряков А.А., Станичный С.В. Спектральные характеристики волн Россби северо-западной части Тихого океана по спутниковым альтиметрическим данным // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 43-52
28. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. В двух частях. М.: Мир, 1981. 365 с
29. Блатов А. С., Тужилкин В. С. Среднемасштабные вихри и синоптическая изменчивость в Мировом океане // Итоги науки и техники. Сер. Океанология. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 8. 248 с
30. Barceló-Llull, Bàrbara. (2014). Quasi-geostrophic vertical motion from satellite and in-situ observations: impact on South East Pacific nitrate distribution through a Lagrangian simulation. 10.13140/RG.2.1.2757.2086.
31. Показеев К. В., Филатов Н. Н. Гидрофизика и экология озер. Том I. Гидрофизика. М.: Физический факультет МГУ, 2002.
32. Филатов Н.Н. Состояние и перспективы исследований гидрофизических процессов и экосистем внутренних водоемов (обзор). Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019;12(1):3-14.
33. Moschos, Evangelos & Schwander, Olivier & Stegner, Alexandre & Gallinari, Patrick. (2020). Deep-SST-Eddies: A Deep Learning Framework to Detect Oceanic

Eddies in Sea Surface Temperature Images.
10.1109/ICASSP40776.2020.9053909.

34. Johannessen, J.A., Digranes, G., Espedal, H., et al., SAR Ocean Feature Catalogue (ESA SP-1174), Noordwijk, Netherlands: ESTEC, 1994.
35. Karimova, S.: Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data, *Adv. Space Res.*, 50(8), 1107- 1124, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.027>, 2012.
36. Лаврова, О. Ю. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С.А. Лебедев, М.И. Митягина, А.И. Гинзбург, Н.А. Шеремет. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
37. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Mission_ends_for_Copernicus_Sentinel-1B_satellite
38. Le Vu, Briac & Stegner, Alexandre & Arsouze, Thomas. (2018). Angular Momentum Eddy Detection and Tracking Algorithm (AMEDA) and Its Application to Coastal Eddy Formation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 35. 739-762. 10.1175/JTECH-D-17-0010.1.
39. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений / Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А., Козлов И. Е. [и др.] – *Исследование Земли из космоса*. – 2016. – № 1 – 2. – С. 129 – 135.