

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и комплексного
управления прибрежными зонами

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Климатическая изменчивость температуры поверхности в Балтийском море.

Исполнитель Лузинова Маремьяна Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

Руководить доктор географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Малинин Валерий Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

« ____ » _____ 2021 г.

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

Введение.....	3
1 Анализ научно-технической информации по тематике исследований.....	12
2 Исходные данные и статистические методы, используемые в работе.....	27
2.1 Исходные данные	27
2.2 Статистические методы, используемые в работе.....	31
3 Результаты расчетов и их обсуждение	37
Заключение	48
Литература	50

Введение

Балтийское море является внутриконтинентальным мелководным частично замерзающим морем бассейна Атлантического океана, омывающим берега девяти стран: Швеции, Финляндии, Латвии, Литвы, Эстонии, Польши, Германии, Дании и конечно же России. Оно находится между параллелями $53^{\circ}40'$ и $65^{\circ}50'$ с. ш. и меридианами $9^{\circ}25'$ и $30^{\circ}15'$ в. д. На западе граница моря проходит по линии мыс Скаген (северная оконечность п-ова Ютландия) – юго-западная оконечность о. Черн (севернее Гетеборга). Связь Балтийского моря с Атлантическим океаном (прежде всего с Северным морем) осуществляется через Датские проливы (Большой и Малый Бельты, Зунд и Фемарн-Бельт) и через проливы Каттегат и Скагеррак, а также через Кильский канал, открытый в 1895 г. Однако основной поток североморских вод проходит через пролив Хамрарне.

Крайняя северная точка Балтийского моря расположена в северной части Ботнического залива вблизи Северного полярного круга ($65^{\circ} 50'$ с. ш.), крайняя южная – в Щецинском заливе на границе между Польшей и Германией ($53^{\circ}40'$ с. ш.); крайняя западная точка Балтийского моря расположена вблизи порта Фленсбург в Германии ($9^{\circ}25'$ в. д.), крайняя восточная – вблизи порта Санкт-Петербург ($30^{\circ}15'$ в. д.). Таким образом, максимальная протяженность Балтийского моря по параллели составляет $20^{\circ}50'$ (1350 км), а по меридиану – $12^{\circ}10'$ (также около 1350 км) [1].

Площадь Балтийского моря вместе с проливами составляет 425,4 тыс. км², объем воды – 20,1 тыс. км³, средняя глубина – 48 м, максимальная – 459 м (в точке $58^{\circ}35'$ с. ш. и $18^{\circ}14'$ в. д.). Преобладают глубины до 50 м, на долю которых приходится 60 % площади моря, на долю глубин более 200 м – около 0,3 % площади моря [1].

Береговая линия Балтийского моря очень длинная и изрезанная, что обусловлено наличием многочисленных заливов и островов. Наиболее изрезанными считаются п-ов Ютландия, а также берега Финского и

Ботнического заливов. Протяженность береговой линии составляет около 22000 км.

Собственно, Балтийское море расположено между переходной зоной и Ботническим, Финским, Рижским и Калининградским (Вислинским) заливами и подразделяется на северную часть (от широты Ирбенского пролива на север), центральную часть (от широты Ирбенского пролива до Клайпеды) и южную часть Балтики (от широты Клайпеды до Датских проливов). Центральная часть Балтийского моря (так называемый Центральный бассейн) по характеру расчлененности рельефа дна также подразделяется на северную, где преобладает выровненный рельеф, среднюю, где рельеф дна имеет ступенчатое строение, и южную, где преобладает холмисто-грядовый рельеф, части. В западной части Центрального бассейна расположены впадины Ландсортская, Норркепинг и Карлсэ, имеющие максимальную глубину 409, 205 и 112 м соответственно. В северной части Центрального бассейна расположена вытянутая в широтном направлении Северо-Балтийская впадина с максимальной глубиной 219 м, которая на востоке при постепенном уменьшении глубин соединяется с Финским заливом. Дно впадин Центрального бассейна хорошо выровнено и представляет собой аккумулятивные поверхности.

Наиболее крупные заливы Балтийского моря – Ботнический, Финский, Рижский, Куршский (рис. 1). Рельеф дна Ботнического залива имеет холмисто-грядовое расчленение: участки холмистого рельефа чередуются с участками выровненного рельефа, где глубины составляют 100—150 м. Здесь же располагаются желоба меридионального простирания, к которым приурочены максимальные глубины впадин. Дно Финского залива также имеет холмисто-грядовый рельеф. При этом в восточной части Финского залива из-за интенсивного стока рек дно образовано хорошо выровненными аккумулятивными равнинами с глубиной 30—50 м. Дно Рижского залива имеет более простую структуру рельефа: оно образует чашеобразную впадину, в центре которой возвышается вытянутое в северо-западном направлении

поднятия с о. Рухну. Преобладающие глубины на дне Рижского залива составляют около 40 м, а максимальная глубина, расположенная восточнее о. Рухну, достигает 56 м. [1]

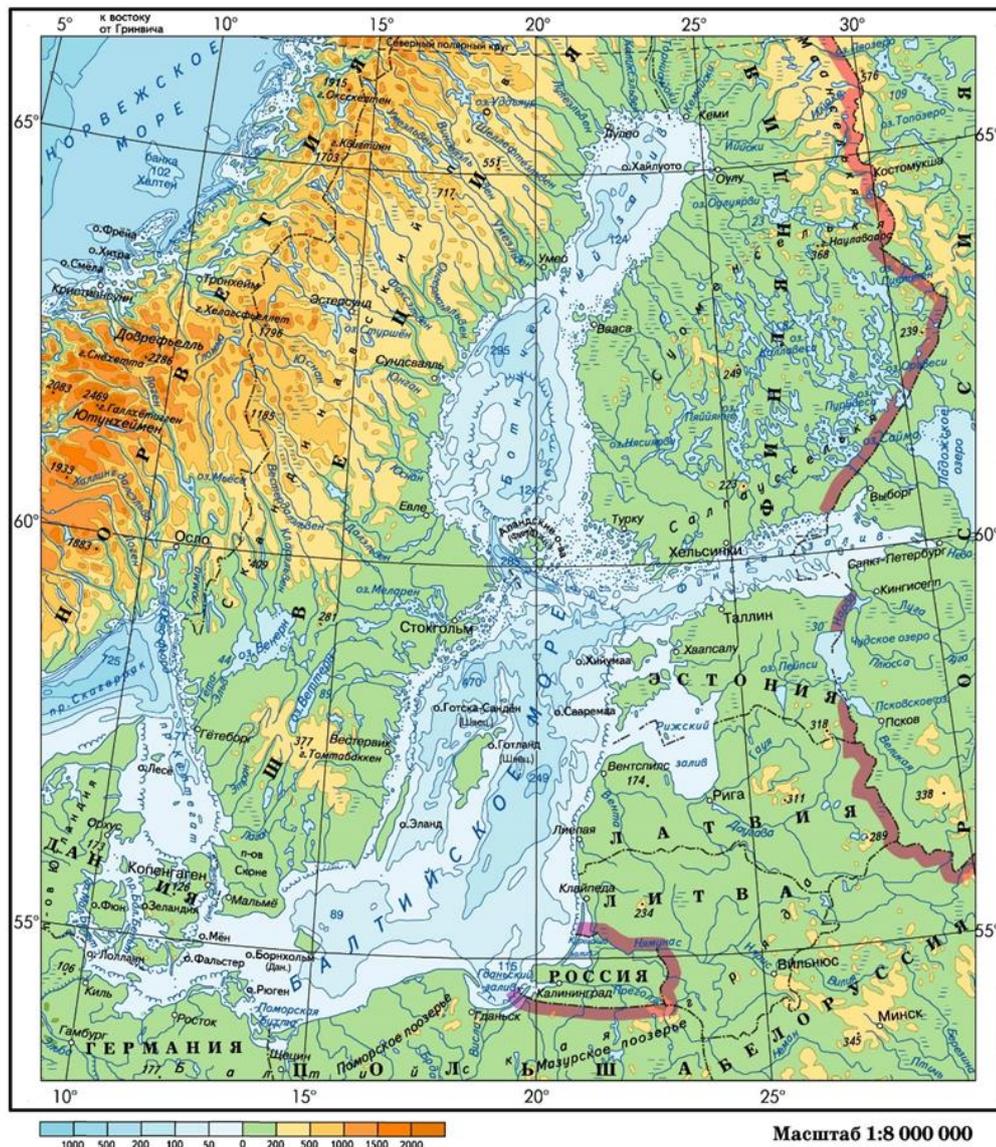


Рисунок 1. Физическая карта Балтийского моря

Формирование температурного режима Балтийского моря происходит под воздействием целого комплекса гидрометеорологических процессов, среди которых выделяются три основных фактора, практически определяющие

пространственную и временную изменчивость тепловых условий в море в широком диапазоне масштабов:

- Поступление тепла или холода через поверхность моря в результате взаимодействия системы море-атмосфера (радиационный фактор);
- Поступление тепла или холода путем водообмена в Северном море и перенос его течениями (адвективный фактор);
- Перенос тепла или холода процессами вертикального обмена (конвекция, турбулентный обмен и др.)

Температурный режим Балтийского моря чрезвычайно своеобразен и в первую очередь связан с наличием поверхностей раздела слоев воды различной плотности (термоклин и галоклин), которые ослабляют процессы взаимодействия моря и атмосферы и препятствуют их распространению в глубинные слои. На глубинах менее 30 м наибольшее влияние на формирование поля температуры оказывает радиационный фактор. В более глубоководных районах моря важное значение приобретают процессы горизонтальной и вертикальной адвекции тепла. По условиям формирования теплового состояния водных масс в Балтийском море можно выделить несколько слоев:

- верхний слой, находящийся под непосредственным воздействием процессов теплообмена на границе вода—воздух и отражающий особенности климатических изменений над акваторией моря;
- промежуточный слой, являющийся реликтом осенне-зимней конвекции и отражающий состояние вод в этот период;
- глубинный слой, подверженный эпизодическим затокам теплых североморских вод, особенно в южной Балтике



Рисунок 2. Средняя многолетняя температура поверхностных вод Балтийского моря в августе по данным [1].

Сезонные изменения температуры вод Балтийского моря происходят на глубинах до 50 – 60 м (глубже 60 м температура меняется очень мало). Зимой температура воды от поверхности до горизонтов 50 – 60 м имеет близкие значения, глубже – становится несколько ниже и остается почти неизменной до дна. Летом температура воды повышается за счет радиационного прогрева (рис. 2), который распространяется до горизонтов 20 – 30 м, далее – скачкообразно понижается до горизонтов 60 – 70 м и затем несколько повышается ко дну [2]. Сезонная изменчивость температуры воды в поверхностном слое открытой части Балтийского моря обусловлена в первую очередь процессами радиационного и конвективного теплообмена и отражает годовую ритмику тепловых процессов над морем в рассматриваемом регионе [1].

Температура воды в верхнем слое Балтийского моря в течение года в юго-западной части моря изменяется от 1,5 – 2,0 до 12 – 18 °С, в южной части – от 1,5 – 1,8 до 14 – 17 °С, в центральной части – от 1,2 – 1,9 до 13 – 17°С и в северной

части моря от 0,8 – 1,1 до 11 – 17°C (рис. 1). Размах колебаний температуры поверхности Балтийского моря может достигать 14 – 16 °C.

Годовой ход поверхностной температуры воды во всех районах моря практически однотипен и отражает основные закономерности климатических изменений тепловых процессов в средних широтах: наибольший прогрев поверхностных вод отмечается летом (июль – август), а значительное охлаждение – зимой (февраль – март). Максимальные значения среднемесячной температуры на поверхности Балтийского моря составляют: в юго-западной части – 16,84 °C, в южной – 16,73 °C, в центральной – 16,52 °C, в северной – 16,49 °C (рис. 2). Минимальные значения среднемесячной температуры поверхности Балтийского моря в южной и юго-западной частях составляют 1,5 – 1,9 °C, в центральной и северной – 0,8 – 1,2 °C. Температура воды в предпроливной зоне и в южной части моря несколько выше чем в центральной и северной, так как центральная и северная части моря имеют гораздо большую глубину и менее интенсивно прогреваются в теплое время года.

В верхнем слое открытой части моря прогрев воды начинается с марта и в начальный период идет медленно, а с увеличением поступающей солнечной радиации и повышением температуры воздуха – более интенсивно. Охлаждение поверхностных вод начинается в сентябре и происходит менее интенсивно, чем весенне-летний прогрев.

Наиболее сложная сезонная изменчивость термической структуры поверхностных вод наблюдается в Арконском бассейне, находящемся в юго-западной части Балтийского моря. В феврале-марте холодный поверхностный слой получает максимальное развитие и имеет минимальную температуру в среднем около 1,5 – 2,0 °C. В то же время в период кратковременных интрузий теплых северных морских вод в придонном слое температура воды может повышаться до 4 – 8°C. Летом максимум температуры воды в верхнем слое (0 – 10 м) наблюдается в августе и достигает значений 16 – 18 °C (рис. 3).

Температура воды в глубинных слоях с октября по март в среднем выше температуры поверхностного слоя примерно на 1 – 2°C.

Менее сложная сезонная изменчивость термической структуры вод наблюдается в Борнхольмском бассейне. Размах колебаний температуры воды в годовом цикле изменяется от 13 – 15 °С в верхнем слое до 5 – 10 °С в промежуточном (30 – 60 м) и до 1 – 3 °С в придонном слое (70 – 90 м). Зимой в Борнхольмском бассейне формируется достаточно холодный верхний слой мощностью до 40 – 50 м и температурой ниже 2°C. Минимальные значения 1,5 – 1,6 °С температуры воды в этом слое отмечаются в марте. Летом, в июле – августе, верхний 10-метровый слой в среднем прогревается до 16 – 17 °С. Температура глубинных вод в этот период значительно ниже поверхностных, а с декабря по апрель в среднем выше на 1 – 5°C.

В целом в открытой части Балтийского моря абсолютные значения средней месячной температуры воды с глубиной уменьшаются, однако на глубине 20 м годовой ход температуры воды еще сохраняет правильные черты годовой ритмики: максимальные значения отмечаются в августе-сентябре, а минимальные – в феврале-марте. Но уже начиная с горизонта 30 м наблюдаются отклонения в годовом ходе температуры воды на большей части акватории моря: появляются вторичные максимумы, а время наступления главного максимума сдвигается в сторону осенне-зимних месяцев, что связано с процессами конвективного и турбулентного переносов тепла в глубинные слои моря.

В прибрежной зоне Балтийского моря годовой ход температуры воды носит однотипный характер и различается только по абсолютным значениям температуры. Среднегодовая температура здесь составляет 8 – 9 °С в южной и 7 – 8 °С в северной части моря. Размах колебаний температуры в течение года составляет 16 – 18 °С на береговых станциях и 12 – 16 °С на островных. Минимальная среднемесячная температура воды изменяется от 0,5 – 1,0°C в южной части моря до 0,0 – 0,5 °С и ниже 0°C в северной. Значения максимальных температур достаточно однородны по акватории моря. В целом по акватории

моря прослеживается общая закономерность: незначительная изменчивость в холодный период года и существенно большая в теплый период, в особенности в переходные периоды (весна и осень). Именно в эти периоды значительное влияние на изменчивость теплового состояния вод в прибрежной зоне оказывает смена синоптических ситуаций, с которыми тесно связаны выходы холодных глубинных вод на поверхность (*апвеллинг*). Интенсивность прогрева в прибрежной зоне Балтийского моря изменяется от 2,73 до 4,10°C/мес, а интенсивность охлаждения от -2,05 до -2,97°C/мес [1].

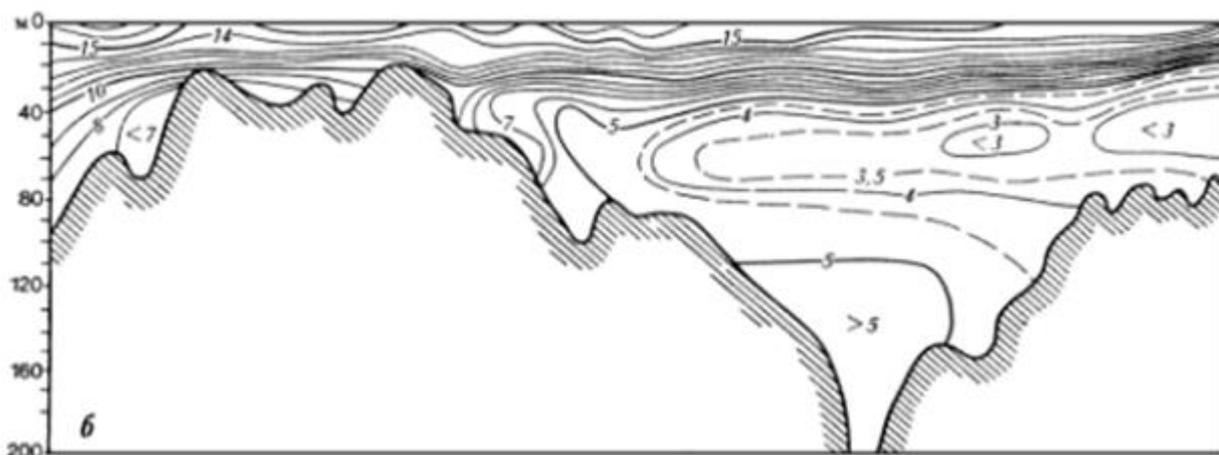


Рисунок 3. Распределение температуры воды с глубиной на разрезе Датские проливы — Финский залив [1]

Актуальность данной работы состоит в том, что в результате современного быстрого потепления климата происходит рост температуры воды в море и ее межгодовой изменчивости, особенности которых, несмотря на большое число публикаций известны в настоящее время еще недостаточно. Изучению этого вопроса и посвящена данная работа.

Цель работы: ознакомиться по литературным источникам с физико-географическими особенностями Балтийского моря, составить собственный архив среднегодовой температуры поверхности Балтийского моря с 1966 по 2019 гг., выполнить статистические расчеты и проанализировать пространственно-временную изменчивость температуры поверхности Балтийского моря.

Задачи работы:

1. Поиск и анализ отечественной и зарубежной научно-технической информации по тематике исследований
2. Подготовка исходных данных
3. Статистический анализ данных
 - 3.1. Первичные статистические характеристики
 - 3.2. Проверка данных на соответствие нормальному закону распределения
 - 3.3. Корреляционный анализ
 - 3.4. Выделение тренда
 - 3.5. Гармонический анализ
 - 3.6. Автокорреляционный анализ
4. Обсуждение результатов

1 Анализ научно-технической информации по тематике исследований

На сегодняшний день температура поверхности Балтийского моря является одной из важнейших характеристик наряду с соленостью, плотностью и химическим составом вод. Существует множество научно-технической литературы, посвященной межгодовой изменчивости температуры поверхности Балтийского моря. Рассмотрим наиболее известные публикации на эту тему.

Лебедев С.А. Климатические изменения температуры поверхности и уровня Балтийского моря по данным дистанционного зондирования [2].

По мнению С. А. Лебедева, Балтийское море очень чувствительно как к изменениям регионального климата, так и к антропогенному воздействию. Данная чувствительность обусловлена низкой соленостью (7 – 18,5 ‰), ограниченным водообменом с Северным морем через Датские проливы и повышенным стоком рек. Следствием климатических изменений являются изменения температуры поверхности моря. Так, температура воды в отдельных частях Балтийского моря в течение года неодинакова: летом температура поверхности моря у восточного побережья на 2 – 3° выше, чем у западного в результате холодного течения из Ботнического залива и преобладающих западных ветров, которые отгоняют прогретые воды от западного берега, зимой же более охлажденными оказываются северные и восточные берега. Соответственно холоднее и воды этих частей моря; они подвергаются более раннему и интенсивному замерзанию.

В своей работе С. А. Лебедев использовал данные международного проекта GHRSSST (GODAE High Resolution Sea Surface Temperature) — эксперимента по усвоению океанографических параметров GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment), представляющие собой среднесуточные поля ТПМ, представленные на регулярной сетке с шагом 0,25° по широте и долготе и обработанные методом оптимальной интерполяции начиная с сентября

1981 г. по настоящее время. Температура поверхности океана рассчитывалась по данным ИК-радиометров AVHRR и ATSR (начиная с июня 2002 г.) (Donlon et al., 2005). Межгодовая или климатическая изменчивость ТПМ рассчитывалась методом наименьших квадратов для каждого узла регулярной сетки. В результате статистической обработки спутниковых данных за период 1982 – 2013 гг. С. А. Лебедев выделил 4 временных интервала подъема (1987–1990, 1996–2002, 2003–2008 и 2010–2013 гг.) и 4 временных интервала падения (1982–1987, 1990–1996, 2002–2003 и 2008–2010 гг.) ТПМ. Так, с января 1982 г. по декабрь 1986 г. ТПМ снижалась со скоростью $-0,28 \pm 0,18$ °С/год, а затем начала расти со скоростью $+0,66 \pm 0,28$ °С/год до декабря 1989 г. С января 1991 г. по декабрь 1995 г. ТПМ снижалась со скоростью $-0,14 \pm 0,17$ °С/год, а с января 1996 г. по декабрь 2001 г. температура поверхности Балтийского моря снова повышалась со скоростью $+0,14 \pm 0,09$ °С/год. После этого до января 2002 г. наблюдалось сильное падение ТПО со скоростью $-0,65 \pm 0,32$ °С/год. Затем с 2002 по 2008 г. температура росла со скоростью $+0,21 \pm 0,15$ °С/год. Однако в январе 2009 г. начался период сильного падения ТПМ со скоростью $-0,58 \pm 0,39$ °С/год. В январе 2010 г. ТПМ начала расти со скоростью $0,16 \pm 0,11$ °С/год, что продолжалось до декабря 2013 г. В среднем в период 1982–2013 гг. температура поверхности Балтийского моря росла со скоростью $+0,04 \pm 0,02$ °С/год. Согласно трендовому анализу, максимальная скорость изменения ТПМ ($+0,17 \pm 0,03$ °С/год) наблюдается в Ботническом заливе, а минимальная ($+0,02 \pm 0,01$ °С/год) — в центральной части Балтийского моря.

Котлярова М.А., Буканова Т.В. Изменчивость температуры поверхности юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным [3].

По мнению М. А. Котляровой и Т. В. Букановой юго-восточная часть Балтийского моря включает наиболее чувствительные к климатическим изменениям районы: прибрежную зону, мелководные заливы (Куршский и Калининградский), районы стока рек (вынос р. Вислы, сток из вышеперечисленных заливов через Балтийский и Клайпедский проливы). В этих районах особенно критично сказывается повышение температуры поверхности

воды в зимний и весенний периоды: затрудняются процессы конвекции, что приводит к нарушению перераспределения питательных веществ и, следовательно, негативно влияет на структуру морских сообществ и их биопродуктивность.

Данная работа посвящена исследованию межгодовой, сезонной и пространственной изменчивости температуры поверхности юго-восточной части Балтийского моря, в том числе в Куршском и Калининградском заливах. Для анализа пространственного распределения ТПМ в юго-восточной Балтике (ЮВБ), оценки ее сезонной и межгодовой изменчивости, выявления тенденций ее изменения на основе линейных трендов использовались данные с изображений спутникового спектрорадиометра MODIS (на спутниках Aqua и Terra) в формате NetCDF из архива OceanColor NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), полученные при обработке в программе SeaDAS. Массивы данных по температуре поверхности моря в ЮВБ были составлены для 77 произвольных экспериментальных точек (66 в открытой части моря, 6 – в Куршском заливе, 5 – в Калининградском). Отобран и обработан 1561 спутниковый снимок (дневные изображения; пространственное разрешение 1 км; уровень обработки - 2; точность измерения ТПМ 0,5 °С; периодичность наблюдений 1-2 раза в сутки) за период с 2003 по 2016 гг. Выборка данных составила 83127 значений. Наибольшее количество значений получено для весенних и летних месяцев (май, июнь - более 10300), наименьшее - для осенних и зимних (ноябрь, январь - менее 3000). Для расчета трендов изменения ТПМ использовалась линейная аппроксимация временных рядов методом наименьших квадратов. Значимость коэффициентов линейной зависимости оценивалась по t-критерию Стьюдента.

В ходе работы установлено, что наиболее высокие значения ТПМ наблюдаются в прибрежной зоне и заливах. С удалением от берега температура равномерно падает, что является типичным явлением для большинства шельфовых морей и прибрежных районов океана. Так, прибрежные точки

демонстрируют повышенные значения ТПМ (выше 12 °С), в открытом море ТПМ не превышает 11 °С. Средняя ТПМ за период исследования (1982 – 2012 гг.) для открытой части моря составляет 11,5, в Куршском заливе - 13,6, в Калининградском - 13,9 °С, что обусловлено мелководностью и замкнутостью заливов, а также тем, что для объектов малых пространственных масштабов определяющими являются локальные гидрометеорологические условия. В течение рассматриваемого периода максимальная среднемесячная ТПМ отмечена в июле и августе, минимальная - в январе, феврале и марте. В открытой части акватории максимум ТПМ отмечен в августе (19 °С), в свою очередь, заливы прогреваются раньше, начиная с мая, и их ТПМ достигают пика, превышающего 20 °С, в июле. В самый холодный период (январь-март) температура поверхности моря варьирует в пределах 2,6–3,5 в открытой части моря и 1–2,1 °С в заливах. Пониженные значения ТПМ в заливах в зимний период обусловлены их мелководностью и регулярным образованием ледового покрова. Выявлен рост ТПМ в теплый период года (лето и весна) и понижение температуры в холодный период (зима и осень) как в открытой части моря, так и в заливах. Наибольшее ее повышение в открытой части ЮВБ отмечено в июне (2,1 °С /14 лет), в свою очередь, максимум роста ТПМ в Калининградском и Куршском заливах зафиксирован ранее в мае (1,7 и 3,0 °С /14 лет соответственно). В холодный период года (зима и осень) наблюдается понижение ТПМ с минимальными значениями в октябре: минус 1,6 °С /14 лет для открытого моря, минус 3,0 и минус 2,6 °С /14 лет для Калининградского и Куршского заливов соответственно. Установлена слабopоложительная тенденция роста ТПМ в открытой части района исследования, составляющая 0,02 °С /год (уровень значимости $p > 0,05$), и 0,01 °С /год в заливах. Линейные тренды статистически незначимы ввиду недостаточной длины временного ряда. Таким образом, рост ТПМ в открытой части моря происходит в два раза быстрее, чем в заливах. Пониженные темпы роста ТПМ в них обусловлены меньшим

теплозапасом мелководных водоёмов по сравнению с глубокими частями моря и меньшей тепловой инерцией.

Мысленков С.А. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термокосы [4].

В данной работе использованы данные термокосы, установленной на морской стационарной платформе Д-6 приблизительно в 20 км от берега в прибрежной зоне Балтийского моря. Термокоса состоит из 10 датчиков Starmon mini, расположенных на горизонтах: -0,9; 0,1; 1; 3; 5; 8; 10; 13; 24; 28 м. Глубина в месте установки составляет 29 м. Самый верхний термодатчик располагался на воздухе (на высоте около 90 см от воды), следующий был заглублен на 10 см. Данная постановка позволяет получать данные о температуре приводного воздуха и тонкого верхнего слоя воды в условиях отсутствия волнения. Проанализирован ряд данных, полученных в период с 5.08.2015 г. по 1.02.2017 года. Также использованы данные метеостанции, установленной на платформе Д-6 на высоте 27 м. Данные о температуре поверхности моря были получены с помощью сканеров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua, запущенных NASA (Национальное аэрокосмическое агентство США) в 1999–2000 гг., и исправно функционирующих в настоящее время. Данные сканера MODIS (Terra и Aqua) в формате NetCDF были получены из оперативного архива OceanColor NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Пространственное разрешение составило 1 км, уровень обработки – L2. Из всего набора предлагаемых параметров были выбраны данные о температуре поверхности моря. Использовались значения температуры, восстановленные по длинноволновому тепловому излучению в дневное время. Карты для температуры поверхности моря строились с учетом исходного разрешения приборов и достаточного охвата исследуемой акватории. При трансформации в карту применялась прямоугольная цилиндрическая проекция с постоянным шагом. Размер выдаваемой карты определялся в соответствии с пространственными и спектральными характеристиками интересующих особенностей, а также с размером района наблюдения. Для обработки и анализа

получаемых данных использовалось программное обеспечение BEAM-Visat (version 4.10) и собственный оригинальный комплекс вспомогательных утилит, позволяющий автоматизировать процесс построения карт распределения физических параметров и их тематическую обработку.

В ходе подробного анализа данных с 5.08.2015 г. по 25.05.2016 гг. были выявлены колебания температуры различных временных масштабов изменчивости: сезонные, синоптические, суточные, инерционные. Периодически в температуре воды наблюдался суточный ход, конвективное перемешивание, апвеллинги. В данной работе сначала было проведено сопоставление спутниковых данных о температуре воды с данными измерений термокосы. Так как ближайший узел, где была восстановлена спутниковая температура, находится в 300 м от платформы, то формально необходимо оценить пространственную неоднородность температуры воды на поверхности в исследуемом районе. Для этого проведено сравнение температуры по пяти ближайшим узлам со спутника, находящимся на расстоянии 1–1,5 км от платформы. Стандартное отклонение по пяти узлам за период с августа по декабрь 2015 г. (всего 35 измерений) меняется от 0,05 до 0,3 °С и в среднем составляет 0,1 °С. Учитывая, что разрешение спутниковых данных по температуре составляет 0,1 °С, вполне можно предполагать однородность поля температуры при сравнении данных термокосы с ближайшим узлом спутниковых данных. Затем было выполнено сравнение температуры воды со спутников с данными термокосы на глубине 1 м. Верхний датчик термокосы находился на глубине 10 см, однако из-за ветрового волнения этот датчик периодически оказывался на воздухе, и использовать эти данные можно только в штилевых условиях. Разность температуры воды по данным термокосы и спутника меняется от -1,5 до 2,7 °С. Средняя разность (систематическая ошибка) спутника по всему ряду данных (98 значений) составила +0,25 °С. В большинстве случаев была получена положительная разность, т. е. значения спутниковой температуры выше, чем результаты измерения термодатчиков. Наличие

отклонений более $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, вероятно, связано с сильным дневным прогревом тонкого верхнего слоя. Для проверки этого предположения были рассчитаны разницы температуры термокосы между горизонтами 1 и 3 м. Если разность между этими слоями невелика, то, следовательно, весь верхний слой хорошо перемешан. Значит, и градиент между значениями температуры на глубине 1 м и в тонком верхнем слое не должен быть большим. В период весеннего прогрева наблюдаются максимальные разности между температурой на горизонтах 1 и 3 м. Если исключить из сравнения случаи, когда разность температуры между горизонтами 1 и 3 м была более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, то диапазон разности температуры воды по данным термокосы и спутника уже существенно сужается и составляет от $-0,75$ до $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Систематическая ошибка спутника по всему ряду данных (61 значение) составила $+0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднеквадратическое отклонение $0,38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В данной работе был выявлен апвеллинг, наблюдавшийся с 13 по 19 августа 2015 г. Перед этим температура воды с глубиной уменьшалась с $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхности до $16\text{--}17\text{ }^{\circ}\text{C}$ на горизонтах $13\text{--}28$ м. Далее значения температура на придонном горизонте (28 м) резко снизились до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем до $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом на горизонте 24 м практически никаких изменений зафиксировано не было. Затем с 13 по 19 августа на глубине 28 м наблюдалась сильная изменчивость температуры, что вызвано расположением термоклина вблизи этого горизонта. Произошедшее событие – классический экмановский апвеллинг, причиной которого стал северо-восточный ветер, дувший со скоростью $8\text{--}12$ м/с на протяжении всего события. После смены направления ветра 19 августа апвеллинг прекратился. По данным спутника в период апвеллинга температура воды в прибрежной зоне составляла около $13\text{--}14\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако это наблюдалось в узкой полосе вдоль берега шириной около 5 км. Следовательно, подъем холодных вод проявился на поверхности только вблизи побережья, а на расстоянии 20 км наблюдался неполный апвеллинг, выраженный на нижних горизонтах. Также по данным спутника в температуре воды видна струя более холодных вод ($16\text{ }^{\circ}\text{C}$), направленная от берега на север и достигающая 19 августа

платформы Д-6. В это время снижение значений температуры было также зафиксировано и на верхних горизонтах термокосы. Температура воды в придонном горизонте резко выросла 19 августа, что, вероятно, связано с уменьшением скорости ветра и изменением направления на северные румбы. С другой стороны, это может быть результатом адвекции струи, наблюдаемой на спутниковом изображении. В результате к моменту пролета спутника 19 августа температура воды на всех горизонтах составляла около 17 °С.

Другой апвеллинг наблюдался с 5 по 12 июня 2016 г. (рис. 5). Тогда температура на верхних горизонтах упала с 19 до 9 °С. Значения температуры на глубине 24–28 м практически не изменились. В этот период наблюдался сильный северный ветер. По данным снимка MODIS от 6 июня 2016 г. широкая (25 – 30 км) полоса холодных вод (до 8–9 °С) вытянута вдоль побережья Литвы и Калининградской области.

В ходе анализа данных установлено, что средняя разность по всему ряду данных составляет +0,25 °С. Наличие отклонений более 2 °С связано с сильным дневным прогревом тонкого верхнего слоя. Исключив из сравнения случаи, когда разность на горизонтах 1 и 3 м термокосы была более 0,1 °С, средняя разность (систематическая ошибка) спутника уменьшается до +0,14 °С, среднеквадратическое отклонение составляет 0,38 °С.

Стонт Ж.И., Буканова Т.В., Крек Е.В. Изменчивость климатических характеристик прибрежной части юго-восточной Балтики в начале 21 в. [5].

Данная работа посвящена особенностям гидрометеорологических условий в юго-восточной части Балтийского моря и оценке тенденций их изменения за 2005—2019 гг. (климатический полупериод). Использовались данные натурных наблюдений атмосферного давления, направления и скорости ветра, температуры воздуха с автоматической гидрометеорологической станции, расположенной в открытом море, а также спутниковые данные инфракрасного и микроволнового (радиолокационные изображения) диапазонов для определения площади морского льда и температуры поверхности моря соответственно. Анализировались среднемесячные показатели температуры на поверхности

Балтийского моря по данным спутниковых изображений радиометров MODIS (на спутниках Terra и Aqua) и VIIRS (на спутнике Suomi-NPP) на сетке 3×3 км в программе SeaDAS (версия 7.4).

Среднегодовая ТПМ в акватории исследования составила $10,3 \pm 0,3$ °С. Самые высокие среднегодовые значения ТПМ ($10,6—10,8$ °С) выявлены в 2008, 2014—2019 гг., самые низкие ($9,8—9,9$ °С) — в 2009—2012 гг., тогда же наблюдались минимальные значения среднегодовой температуры воздуха. Минимум в годовом ходе ТПМ приходится на февраль и март ($2,6$ и $2,7$ °С соответственно). Максимальной ТПМ становится в августе ($19,3$ °С). Положительное приращение средней ТПМ наблюдается с марта по июнь. В период с августа по октябрь происходит ежегодное понижение ТПМ. Наибольшее положительное приращение ТПМ происходит в мае ($+1,5$ °С/период), а наибольшее отрицательное приращение — в октябре ($-1,5$ °С/период). При этом в самый теплый месяц года (август) происходит снижение ТПМ со скоростью $-1,1$ °С/15 лет. В целом за 2005—2019 гг. рост ТПМ в районе исследования составляет $+0,01$ °С/год и $+0,2$ °С/период. Однако линейный тренд статистически незначим: он составил $0,0118$ °С/год.

Абрамов Р.В., Гуцин О.А., Навроцкая С.Е., Стонт Ж.И. Гидрометеорологический мониторинг побережья юго-восточной Балтики в 1996 – 2010 гг. [6].

В работе исследуются гидрометеорологические измерения, выполненные в пункте наблюдений Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (АОИОРАН) – действующей метеолаборатории на борту музейного судна “Витязь”, ошвартованного в центре г. Калининграда на правом берегу р. Преголи. Мониторинг, на который опирается данная работа, включает ежедневные наблюдения атмосферного давления P гПа; температуры воздуха T_a и воды T_w °С; точки росы, τ °С; осадков, N_s (от нем. Niederschläge), мм; ветра (модуль V , зональный Z , меридиональный M), м/с; течения – прямое $F \rightarrow$ и обратное $\leftarrow F$, м/с; уровня воды, H см БС, полученные в метеолаборатории музейного судна “Витязь” (устье р. Преголи, центр г. Калининграда) в 1996–2010

гг, а также их корреляционный анализ. Согласно результатам корреляционного анализа, наибольшая теснота связи из всех элементов матрицы (0.82) наблюдается между температурой воздуха T_a и температурой воды T_w в реке Преголя.

Стонт Ж.И. Современные тенденции изменчивости гидрометеорологических параметров в юго-восточной части Балтийского моря и их отражение в прибрежных процессах [7].

В данной работе исследовано пространственно-временное распределение температуры воздуха и температуры поверхности моря и связанные с ними ледовые условия в юго-восточной части Балтийского моря. Оценка изменчивости ТОМ в ЮВБ проведена на массивах данных, полученных дистанционным методом со сканера цвета океана MODIS, установленного на спутниках Aqua и Terra Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США (NASA). Начиная с 2003 г., в открытой части ЮВБ изменения ТПМ по спутниковым данным характеризуются положительными линейными трендами от 0,03 до 0,14 °С/год в зависимости от местоположения станции. Построенная карта распределения трендовых приращений показывает, что тренд и приращение за 2003-2012 гг. для прибрежных станций опережает приращение для открытой части ЮВБ.

В среднем по станциям, расположенным по акватории ЮВБ, линейный тренд составляет $0,07 \pm 0,03$ °С/год и приращение за период 2003-2012 гг. (десять лет) составило $0,7 \pm 0,27$ °С/период. В течение рассматриваемого периода основной трендовый прирост температуры воды на поверхности в ЮВБ происходил в теплое время года: весной ($0,5 \pm 0,38$ °С/10 лет) и максимальный прирост летом ($1,1 \pm 0,37$ °С/10 лет). Приращение в соответствии с трендом за зимний и осенний периоды отрицательно $-0,4 \pm 0,56$ и $-0,9 \pm 1,00$ °С/10 лет. Максимальное падение до $-1,4$ °С/10 лет наблюдалось зимой на станциях, расположенных на севере района. В свою очередь прибрежные станции демонстрируют наибольшие положительные трендовые приращения зимой (до $0,6$ °С/10лет). Повышение температуры поверхности моря в ЮВБ, которое

составило $0,7 \pm 0,27$ °С за последнее десятилетие, определяет ЮВБ как регион быстрого потепления.

Стонт Ж.И., Навроцкая С.Е., Чубаренко Б.В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе [8].

В данной работе анализируется изменчивость среднегодовых значений температуры воздуха, атмосферных осадков и уровня моря с климатическим осреднением (в пределах 30-летних климатических периодов со сдвигом 30-летнего «окна» с шагом 10 лет) для Калининградской области за период 1901 – 2018 гг.

По мнению Ж. И. Стонт, С. Е. Навроцкой и Б. В. Чубаренко, повышение температуры воды обусловлено изменениями температуры воздуха и атмосферной циркуляции. Так, за период 1982 – 2006 гг. среднегодовая температура поверхности моря в Балтике увеличилась на $1,35$ °С, среднее повышение за 10 лет составило $0,3$ – $0,8$ °С, особенно в северных районах (на 1 °С). За период 1997 – 2002 гг. среднегодовая температура воды в Куршском заливе увеличилась на $1,3$ °С в Ниде и на $1,0$ °С в Клайпеде. За период с 2003 по 2016 гг. средняя температура поверхности моря, по данным спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниках Aqua и Terra, для открытой части моря, составила $11,5$ °, в Куршском заливе – $13,6$ °, в Калининградском – $13,9$ °С. ТПМ юго-восточной части Балтийского моря ежегодно увеличивается. Темпы роста ТПМ в открытой части акватории составляют $0,02$ °С/год, а в Куршском и Калининградском заливах – $0,01$ °С/год (уровень значимости $p > 0,05$).

Стонт Ж.И., Дубравин В.Ф., Капустина М.В. Эволюции (сезонная и межгодовая изменчивость) суточного хода гидрометеорологических полей южной Балтики [9].

В данной работе приведены результаты анализа данных натуральных наблюдений (температура воздуха (T_a), точка росы (T_d), или относительная влажность (f), атмосферное давление на уровне моря (P_0) и скорость ветра (W)), полученных автоматической гидрометеорологической станцией МиниКРАМС-4, установленной в пределах экономической зоны РФ в юго-восточной части

Балтийского моря на морской ледостойкой стационарной нефтяной платформе ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» (D6), а также на станциях мониторинговой сети MARNET Немецкого центра океанографических данных (BSH/DOD(M41)) за 2002—2016 гг., на которых кроме метеоэлементов исследованы температура T_w и соленость S верхнего слоя моря. Для анализа временной изменчивости различных масштабов использовались данные натуральных наблюдений гидрологических (температура T_w и соленость S верхнего слоя моря) и метеорологических параметров (температура воздуха T_a , точка росы T_d (относительная влажность f), атмосферное давление на уровне моря P_0 и скорость ветра W) на станциях Аркона, Дарсский порог, Фемарн-Бельт и Киль (дискретность — один час), мониторинговой сети MARNET Немецкого центра океанографических данных (BSH/DOD(M41)) за 2002—2016 гг. (соглашение 2518/2016—075), а также T_a , T_d , P_0 и W , полученных автоматической гидрометеорологической станцией МиниКРАМС-4, установленной на нефтяной платформе D6, за 2004—2016 гг. Исходные ряды обрабатывались с использованием дисперсионного, гармонического и корреляционного методов анализа.

Результаты работы показали, что удельный вклад дисперсии короткопериодной изменчивости (КП) в дисперсию исходного ряда для T_w , T_a , T_d составил $1 \div 19\%$. В то же время вклад долгопериодной изменчивости (ДП) в дисперсию исходного ряда для T_w , T_a , T_d составил $81 \div 99\%$. Удельный вклад суточного хода (СХ) для T_w составил менее $0,5\%$.

Бойцов В.Д. Долгопериодная изменчивость температуры поверхности Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг. [10].

В данной статье сравнительный анализ долгопериодной межгодовой изменчивости температуры поверхности Северного и Балтийского морей в 1900 – 2020 гг. Анализ проводился по годовым значениям, осредненным в трапециях площадью $2 \times 2^\circ$ по долготе и широте и отнесенным к их центрам. Данные взяты из архива NOAA NCDC ERSST (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/>). Также в работе были вычислены климатические нормы анализируемых параметров за

период с 1961 по 1990 г.: линейный и нелинейный тренды, низкочастотные циклические компоненты, коэффициенты корреляции, регрессии и первичные статистические характеристики. Расчеты производились с помощью пакета MS Excel 2009.

Результаты работы показали, что вклад нелинейного тренда в дисперсию температуры поверхности Балтийского моря составил 31 %. Установлено, что температура поверхности Балтийского моря в течение каждого десятилетия увеличивалась за счет тренда в среднем на $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$, а среднегодовая температура поверхности Балтийского моря составляет $8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. До 1932 г. в Балтийском море наблюдалось умеренное понижение температуры относительно нормы за 1961—1990 гг. в среднем на $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. С 1932 по 1950 г. наблюдалось потепление, которое проходило в два этапа и во время которого температура поверхности Балтийского моря была выше нормы на $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем наступило кратковременное, но значительное похолодание, когда температура воды в 1940—1942 гг. была ниже среднемноголетнего уровня в среднем на $1,38\text{ }^{\circ}\text{C}$. С 1943 по 1950 гг. температура вновь была выше нормы на $0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$. После этого до 1974 г. температура поверхности Балтийского моря превышала норму лишь на $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Затем наступил непродолжительный период похолодания водных масс, во время которого за 12 дней температура поверхностных вод Балтийского моря была ниже нормы на $0,54\text{ }^{\circ}\text{C}$. После 1987 г. началось современное потепление водных масс Балтийского моря, во время которого отклонение поверхностной температуры от нормы составило $0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вклад тренда в изменчивость поверхностной температуры Балтийского моря возрастал в меридиональном направлении с юга на север, в зональном – с запада на восток. Так на меридиане 18° в.д вклад тренда в дисперсию исходных данных составляет 20 %, а скорость роста температуры $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Далее эти показатели увеличиваются в восточном направлении, достигая максимума 28 % и $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет на меридиане 22° в.д. Затем вклад тренда уменьшается до 22 %, а скорость роста температуры — до $0,10\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет на акватории вдоль 24° в.д.

Нелинейный тренд в годовых колебаниях поверхностной температуры Балтийского моря описывал 41 % от дисперсии исходных данных.

Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Балтийского моря [11].

В данной работе проведен анализ среднемесячных значений температуры Балтийского моря на поверхности и различных глубинах за период с 1854 по 2017 гг. В качестве исходных данных были взяты среднемесячные данные температуры поверхности океана (ТПО) NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v5 (ERSSTv5) на сетке $2 \times 2^\circ$ за период 1854–2017 гг и среднемесячные данные температуры Балтийского моря на 56 различных глубинах 0–700 м Copernicus Marine Environment Monitoring Service's (CMEMS) Baltic Monitoring and Forecasting Centre (BAL MFC) BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 на сетке 4×4 км за период 1993–2016 гг. Осреднение данных производилось с учетом соответствующих масок суши из анализируемых источников. В каждом узле сетки рассчитывался средний сезонный ход за рассматриваемый период, который затем вычитался из исходных данных для получения аномалий относительно сезонного хода. Линейные тренды рассчитывались методом наименьших квадратов.

Анализ данных показал существенный рост температуры поверхности (ТП) Балтийского моря за последние десятилетия. Так, по данным ERSSTv5 средняя температура поверхности Балтийского моря за 1950–2017 гг. увеличивалась в среднем на $0,15$ °C за 10 лет. При этом потепление Балтики по акватории происходит неравномерно: крайняя восточная часть моря (Рижский и Финский заливы) нагреваются со скоростью более $0,6$ °C за 10 лет, а зона у юго-восточного побережья Швеции нагревается со скоростью около $0,2$ °C за 10 лет, что, вероятно, связано с усилением прибрежного апвеллинга в этом районе. Для среднемесячной температуры поверхности Балтийского моря характерен существенный сезонный ход, порядка 15 – 20 °C. На фоне общего роста температуры наблюдается сильная межгодовая изменчивость ее аномалий относительно сезонного хода. Так, средние аномалии температуры в теплые

полугодия (май-октябрь) 2002 и 2006 гг. превышали $+2$ °С, а в теплое полугодие 1987 г. были отрицательными и превышали -2 °С. Помимо отдельных аномально теплых и холодных полугодий наблюдаются аномалии продолжительностью более года. Так, например, 1985–1987 гг. были аномально холодными, после чего последовал резкий климатический сдвиг, отмеченный и в изменениях глобальной температуры воздуха. В ходе анализа аномалий температуры после удаления линейного тренда выявлены сильные междекадные изменения. Так, после относительно теплого периода 1950–1976 гг. последовал период отрицательных аномалий 1977–1987 гг., который сменился снова на теплый период, продолжавшийся до 1999 г.

2 Исходные данные и статистические методы, используемые в работе

2.1 Исходные данные

В качестве исходных данных была выбрана среднегодовая температура поверхности Балтийского моря с 1966 по 2019 гг. в десяти точках:

1. 65° с.ш., 25° в.д. (Ботнический залив, остров Хайлуото)
2. 60° с.ш., 20° в.д. (Аландские острова)
3. 60° с.ш., 25° в.д. (Хельсинки)
4. 60° с.ш., 30° в.д. (Санкт-Петербург)
5. 55° с.ш., 20° в.д. (Калининград)
6. 55° с.ш., 15° в.д. (остров Борнхольм)
7. 57° с.ш., 18° в.д. (остров Готланд)
8. 58° с.ш., 23° в.д. (Рижский залив)
9. 58° с.ш., 20° в.д. (не отмечено)
10. 63° с.ш., 20° в.д. (Ботнический залив)

Данные скачаны с сайта

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Diagnostic/.surface/.temp/>

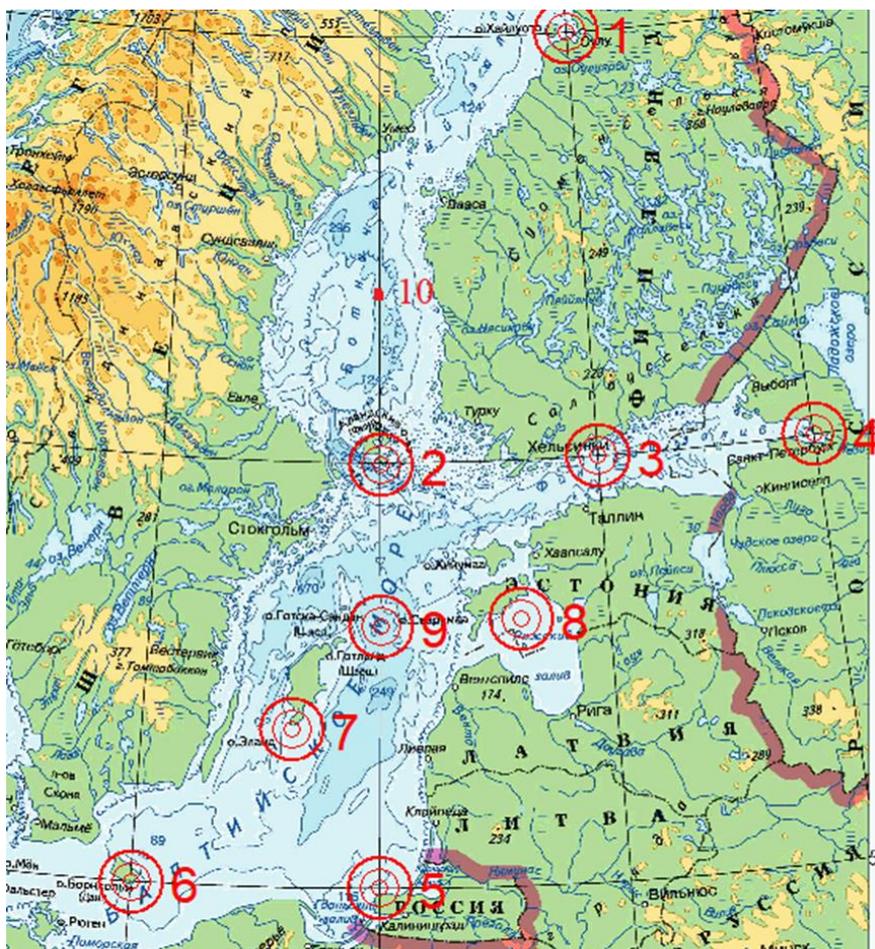


Рисунок 4. Пространственное распределение точек на акватории моря

Таблица 1. Среднегодовая температура Балтийского моря с 1966 по 2019 гг. в 10 точках

Год	Температура									
	точка1	точка2	точка3	точка4	точка5	точка6	точка7	точка8	точка9	точка10
1966	-1,74	7,42	3,74	2,16	6,99	7,70	7,84	7,55	7,74	2,44
1967	0,81	7,79	5,20	3,83	8,18	8,91	8,70	7,94	8,33	4,43
1968	-0,13	7,56	4,58	2,57	6,18	8,65	8,52	7,73	8,07	3,78
1969	-0,32	7,72	4,08	1,86	6,33	8,43	8,39	7,76	8,12	3,16
1970	-0,19	7,60	4,35	2,39	6,30	8,03	8,14	7,69	7,97	3,43
1971	-0,98	7,46	5,07	2,21	7,24	8,38	8,34	7,72	8,00	3,14
1972	1,40	7,56	5,58	4,35	7,42	8,65	8,44	7,77	8,10	3,56
1973	-0,30	7,83	5,24	3,51	7,83	9,06	8,87	8,08	8,25	4,72
1974	1,13	7,81	5,64	4,16	7,57	8,83	8,71	7,93	8,40	4,88
1975	1,05	8,19	6,46	4,78	8,84	9,24	9,04	8,22	8,76	5,70
1976	-1,23	7,26	3,81	1,18	6,58	8,46	8,25	7,57	7,89	3,97
1977	-0,69	5,83	4,04	2,86	7,69	8,53	8,23	6,63	7,72	2,01

1978	-2,00	6,94	3,48	1,56	6,29	8,04	7,85	7,21	7,47	1,72
1979	-0,59	5,89	4,09	2,92	6,93	8,24	7,93	5,72	7,71	1,81
1980	-0,99	6,07	4,18	2,74	6,16	8,61	8,08	6,04	7,79	2,73
1981	-1,56	7,25	4,55	3,30	7,51	8,59	8,05	7,17	7,86	3,17
1982	0,22	6,70	5,13	3,62	7,88	8,46	8,56	6,65	7,97	1,60
1983	-0,21	7,52	6,08	4,48	8,93	8,96	8,93	8,14	8,46	3,43
1984	-0,20	7,96	5,40	3,45	7,58	8,24	8,66	7,86	8,50	3,92
1985	-2,64	4,51	3,18	1,65	6,77	6,76	7,56	4,77	6,94	-0,15
1986	-1,25	5,85	4,15	2,92	7,52	7,52	8,32	6,09	7,63	1,06
1987	-2,10	3,53	2,64	1,40	6,25	6,66	6,98	3,44	5,56	0,05
1988	-0,36	7,44	5,37	3,76	8,04	8,43	8,81	7,72	8,16	4,52
1989	1,07	8,16	6,82	5,54	9,29	9,59	9,56	8,62	8,94	5,25
1990	0,24	8,03	6,05	4,32	8,82	9,71	9,82	8,33	8,92	5,26
1991	-0,16	8,04	5,70	3,97	7,89	8,59	9,01	8,24	8,68	5,17
1992	0,20	8,27	5,78	4,41	8,48	9,26	9,51	8,45	8,99	4,71
1993	-0,86	7,70	4,74	2,48	7,49	8,08	8,79	7,94	8,45	3,27
1994	-0,66	6,58	4,47	2,92	7,98	9,19	8,99	6,46	8,30	2,48
1995	0,48	7,84	5,84	4,12	8,03	9,47	9,30	7,85	8,40	4,90
1996	-0,28	6,70	3,93	2,67	5,96	7,35	8,17	5,62	7,64	2,69
1997	0,20	8,24	5,65	3,40	7,62	9,13	9,35	8,17	8,71	4,63
1998	-0,54	7,73	4,80	2,39	7,69	8,74	8,89	7,92	8,31	5,18
1999	0,80	8,25	6,23	4,59	8,71	8,90	9,46	8,05	8,78	4,75
2000	2,06	7,86	6,54	4,91	9,39	9,46	9,44	7,98	8,56	5,22
2001	0,72	8,14	5,47	3,58	7,58	9,24	9,64	8,12	8,83	4,86
2002	0,44	8,27	5,66	3,86	9,00	9,43	9,83	8,06	8,99	3,40
2003	1,04	6,33	5,22	3,79	7,52	8,90	8,86	6,33	7,67	1,91
2004	0,87	7,85	5,54	3,58	7,57	8,87	9,22	7,69	8,41	4,64
2005	1,70	8,45	5,96	4,38	7,82	9,36	9,57	8,13	9,03	4,72
2006	1,99	7,72	6,37	4,86	8,40	9,52	9,58	7,02	8,80	4,00
2007	1,70	8,11	6,46	4,79	8,61	9,62	9,55	8,08	8,89	3,84
2008	1,49	8,64	6,94	5,35	9,17	9,84	10,04	8,66	9,29	5,07
2009	0,84	8,23	5,65	3,95	7,82	9,15	9,43	8,38	8,87	4,16
2010	-0,08	6,40	4,85	3,85	7,16	8,11	8,53	7,20	7,88	2,50
2011	2,47	7,76	6,62	5,29	8,44	8,29	8,71	7,33	8,35	3,60
2012	0,31	8,16	5,24	3,48	7,90	8,86	9,23	7,91	8,71	4,25
2013	2,08	8,06	6,53	5,15	7,91	9,16	9,38	7,18	8,31	4,18
2014	1,98	8,75	6,59	5,00	9,11	10,36	10,08	8,62	9,26	6,12
2015	2,61	9,14	7,15	5,79	9,11	9,78	10,02	9,06	9,57	6,58
2016	1,77	8,67	6,13	4,55	8,79	10,27	10,36	8,93	9,46	5,49
2017	1,00	8,30	5,96	4,29	8,34	9,33	9,71	8,43	8,98	5,60
2018	1,95	9,16	6,84	4,92	8,78	10,27	10,55	9,28	9,89	4,82
2019	1,24	8,53	7,00	5,52	9,72	10,07	10,11	8,93	9,37	4,85

Следует отметить, что в точке 1 в период с 1966 по 2010 гг. наблюдалась отрицательная среднегодовая температура поверхности моря. Это связано с тем, что большую часть года северная часть Ботнического залива покрыта льдом, температура которого почти равна температуре воздуха.

Также в качестве исходных данных были выбраны аномалии среднегодовой температуры всей поверхности Балтийского моря с 1870 по 2014 гг. Данные скачаны с сайта <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/annual-average-sea-surface-temperature-6/download.table>.

Таблица 2. Временной ход аномалий годовой температуры поверхности Балтийского моря с 1870 по 2014 гг

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1870	-1,02	-1,62	-0,66	-1,01	-0,59	-0,77	-1,26	-1,64	-0,75	-1,41
1880	-0,79	-1,47	-0,53	-0,80	-0,28	-0,79	-0,81	-1,67	-1,71	-0,73
1890	-0,91	-1,18	-1,53	-1,27	-0,98	-1,20	-0,69	-1,16	-0,62	-0,67
1900	-0,79	-0,87	-1,73	-1,27	-1,12	-0,77	-0,61	-1,32	-0,95	-1,37
1910	-0,43	-0,56	-1,15	-0,46	-0,15	-1,28	-1,36	-1,90	-1,38	-1,80
1920	-0,62	-0,55	-1,14	-1,23	-1,32	-0,59	-0,73	-0,88	-1,37	-1,54
1930	-0,17	-1,57	-0,57	-0,55	0,21	-0,37	-0,19	-0,04	0,18	-0,45
1940	-1,43	-1,69	-1,71	-0,60	-0,89	-0,52	-0,90	-0,78	-0,91	-0,33
1950	-0,28	-0,66	-0,99	-0,31	-0,68	-0,72	-1,42	-0,76	-0,84	0,01
1960	-0,52	-0,02	-1,08	-0,79	-0,73	-0,91	-0,76	-0,11	-0,30	-0,52
1970	-0,86	-0,70	-0,49	0,03	-0,24	0,31	-0,85	-0,96	-1,15	-1,65
1980	-1,12	-1,17	-0,70	-0,60	-0,49	-1,75	-1,23	-2,02	-0,44	0,21
1990	0,22	-0,34	0,07	-0,68	-0,35	-0,09	-0,86	0,02	-0,34	0,35
2000	0,23	0,29	0,45	-0,18	-0,07	0,25	0,43	0,44	0,83	0,07
2010	-0,48	-0,17	-0,16	0,06	0,79					

2.2 Статистические методы, используемые в работе

Описательная статистика [12, 13]

Инструмент, входящий в пакет «Анализ данных» табличного процессора Microsoft Excel. Рассчитывает первичные статистические характеристики исследуемого ряда: среднее значение, стандартное отклонение, дисперсия, коэффициент асимметрии, эксцесс, минимум и максимум, а также размах вариации.

Критерий Пирсона [12, 13]

С помощью критерия Пирсона (χ^2) производится проверка данных на соответствие нормальному закону распределения. Для этого исходный ряд делится на k интервалов по формуле

$k_{max} \approx 5 \lg n$, где n – длина ряда. После этого вычисляется размах каждого интервала по формуле

$$\Delta x_k = \frac{x_{max} - x_{min}}{k_{max}}$$

а также определяется среднее значение для каждого интервала. Далее с помощью функции СЧЕТ вычисляется частота m_k попадания исходных данных в каждый из интервалов, а затем эти частоты суммируются. После этого вычисляется обеспеченность появления значения характеристики в конкретном интервале:

$$p' = \frac{m'}{n},$$

где m' – сумма частот m_k . Далее для каждого интервала с помощью функции НОРМ.РАСП. ($x_k, x_{cp}, \sigma, 0$) определяется плотность вероятности нормального распределения $f(x_k, x_{cp}, \sigma, 0)$, которая переводится в значения соответствующих частот нормального закона по формуле:

$$n_k^* = f(x_k, \bar{x}, \sigma, 0) * \Delta x_k * n,$$

где Δx_k – размах интервала, n – длина исходного ряда. Для дальнейшего анализа данных частоты нормального закона округляются до целых значений n_k . После этого вычисляется эмпирический критерий распределения:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{k_{max}} (m_k - n_k)^2}{n_k}$$

Далее с помощью функции ХИ2ОБР определяется критическое значение критерия распределения $\chi^2_{кр} (0,05; \nu)$, где $\nu = k_{max} - 3$ – число степеней свободы. Для того чтобы данные соответствовали нормальному закону распределения, должно выполняться условие $\chi^2 \geq \chi^2_{кр}$.

Корреляционный анализ [12, 13]

С помощью корреляционного анализа определяется тип взаимосвязи между двумя переменными. По типу взаимосвязь делится на функциональную, абсолютно случайную и стохастическую, по характеру – на прямую и обратную зависимость. Тип и характер связи определяются с помощью коэффициентов корреляции r , а также по облаку точек или эллипсу рассеяния, то есть по графику зависимости двух переменных. Если $r = 0$, то связь между переменными является абсолютно случайной, то есть одному значению первого ряда соответствует любое значение второго ряда, а облако точек вырождено в круг, то есть его большая и малая оси почти равны. Если $|r| = 1$, то связь между переменными является функциональной, то есть одному значению первого ряда соответствует только одно значение второго ряда, а облако точек вырождено в прямую линию, то есть имеет только большую ось. Во всех остальных случаях связь стохастическая. Что касается характера связи, то он определяется по знаку коэффициента корреляции. Если $r > 0$, то связь прямая, то есть при возрастании одной величины другая имеет тенденцию возрастать. Если же $r < 0$, то связь обратная, то есть при возрастании одной величины другая имеет тенденцию убывать.

Проверка коэффициентов корреляции на значимость производится с помощью критерия Стьюдента, выборочное значение которого рассчитывается по формуле: $t^* = \frac{|r|}{\sigma_r}$,

где $\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-2}}$

Далее рассчитывается $r_{кр}$:

$$r_{кр} \approx \frac{2}{\sqrt{n+2}}.$$

Если $r > r_{кр}$, то коэффициент корреляции значим [13].

Регрессионный анализ [12, 13]

Служит для построения регрессионной модели, с помощью которой рассчитывается тренд, и последующего удаления тренда. Выделение тренда осуществляется с помощью инструмента «Регрессия» пакета «Анализ данных» табличного процессора Microsoft Excel и последующего составления уравнения регрессии. Тренд может быть линейным и нелинейным (квадратичным). В первом случае уравнение регрессии принимает вид: $Y' = aX + b + \varepsilon$, где X и Y' – независимая и зависимая переменные, a – коэффициент регрессии при независимой переменной, b – свободный член, ε – остатки регрессии. Во втором случае уравнение регрессии принимает вид: $Y' = aX^2 + bX + \varepsilon$, где a , b – коэффициенты регрессии при независимых переменных, X и Y' – независимая и зависимая переменные. В качестве независимой переменной в первом случае выбирается дополнительно созданный ряд $t_i = i$, где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n – длина исходного ряда), во втором случае – дополнительно созданные ряды $t_i = i$ и $t_i^2 = i^2$. В качестве зависимой переменной в обоих случаях выбирается ряд значений температуры поверхности моря в данной точке. Коэффициенты a , b , c рассчитываются с помощью инструмента «Регрессия» пакета «Анализ данных» табличного процессора Microsoft Excel. Процент вклада тренда в дисперсию исходных данных определяется по значениям $r^2_{норм}$, умноженным на 100%. Если разница значений $r^2_{норм}$ между линейным и нелинейным трендами в точке составляет больше 5%, то при дальнейшем анализе удаляется тот тренд, вклад которого больше. Если же разница значений $r^2_{норм}$ между линейным и нелинейным трендами менее 5 %, то в данной точке тренда нет, и при дальнейшем анализе удаляется среднее значение данного ряда.

Гармонический анализ [12,13]

С помощью гармонического анализа исходный ряд восстанавливается по сумме наиболее значимых гармоник. Для этого первым делом из исходного ряда удаляется тренд (если он значим) или среднее значение (если тренд незначим). Далее в программе Past3 рассчитывается периодограмма (таблица и график) для ряда отклонений, которая затем переносится в Excel. «Пикам» периодограммы соответствуют точки максимума на графике. Это и есть гармоники – циклические составляющие, представляющие собой тригонометрические функции, имеющие периоды, кратные длине ряда. Для дальнейшего анализа нужно выбрать от 1 до 5 наиболее значимых гармоник.

Далее для каждой из выбранных гармоник вычисляются характеристики:

- Амплитуда гармоники $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$,

где a_k, b_k – коэффициенты Фурье:

$$a_k = \frac{2\varepsilon \sin \omega t_i}{n}$$

$$b_k = \frac{2\varepsilon \cos \omega t_i}{n}$$

(ε – отклонения, ω – частота гармоники, t – порядковый номер отклонения, n – длина ряда)

- фаза гармоники

$$\varphi = \arctg \frac{a_k}{b_k} \pm \pi$$

- дисперсия гармоники

$$D_k = \frac{A_k^2}{2}$$

- вклад гармоники в дисперсию ряда отклонений

$$V_k = \frac{D_k}{D_y}$$

- величина гармоники

$$G_k = A_k \cos(\omega t_i - \varphi_k)$$

Далее все гармоники проверяются на значимость с помощью критерия Стьюдента:

$$t^* = \frac{V_k}{\sqrt{D_k}}$$

Если $t^* > t_{кр}$, то гармоника статистически значима ($t_{кр}$ определяется с помощью функции СТЬЮДРАСПОБР (0,05; n-2).

Автокорреляционный анализ [12, 13]

С помощью автокорреляционного анализа определяется заблаговременность автопрогноза. Для этого первым делом из исходного ряда удаляется тренд (если он значим) или среднее значение (если тренд незначим). После этого для ряда остатков с помощью функции КОРРЕЛ табличного процессора Microsoft Excel вычисляется автокорреляционная функция (АКФ) – корреляция ряда с самим собой при различных сдвигах во времени. В данном случае максимальное количество сдвигов $\tau = 10$ для данных в 10 точках и $\tau = 15$ для данных во всем море. Далее для каждого сдвига рассчитывается критическое значение коэффициента автокорреляции:

$$r_{кр} = \frac{-\sqrt{n - \tau - 1} + \sqrt{n - \tau - 1 + 4t_{кр}^2}}{2t_{кр}},$$

где $t_{кр}$ для каждого сдвига определяется с помощью функции СТЬЮДРАСПОБР (0,05; n - t_i - 2), где t_i – номер сдвига. После этого строится совместный график для АКФ, $r_{кр}$ и $-r_{кр}$, на котором по радиусу корреляции $\tau_{кор}^2$ определяется инерционность процесса (радиус корреляции – сдвиг при первом пересечении АКФ нуля). По инерционности процессы делятся на малоинерционные ($\tau_{кор}^2 = 1 - 2$) и инерционные ($\tau_{кор}^2 > 4-5$).

Далее с помощью локальных максимумов на графике процесс анализируется на периодичность: сколько выявляется значимых локальных максимумов на графике, столько и периодических составляющих присутствует

в процессе. Тогда период циклического колебания $\tau_{\text{пер}}$ определяется по сдвигу АКФ, соответствующему локальному максимуму.

Далее по форме АКФ определяется тип процесса. Всего существует 4 основных типа процессов.

- «белый шум». Характеризует абсолютно случайный процесс. Значения АКФ равны нулю на всех сдвигах, кроме $\tau = 0$;
- простая цепь Маркова I порядка. Характеризует процесс, для которого свойственна связь со своим предыдущим состоянием. АКФ имеет значимый коэффициент автокорреляции на сдвиге $\tau = 1$;
- «красный шум». Характеризует процесс с высокой инерционностью (более 5 единиц дискретности). Может отражать наличие в исходном ряду периодичности с периодом, сравнимым с длиной ряда. (Служит признаком того, что в исходном ряду, возможно, не удален тренд). В АКФ отмечается радиус корреляции > 5 ;
- циклический (квазигармонический) процесс. Характеризует процесс с устойчивым ярко выраженным периодическим колебанием.

В некоторых случаях процессы имеют смешанный тип.

После определения типа процесса оценивается заблаговременность прогноза. Если АКФ не представляет собой «белый шум», на ней отмечаются значимые коэффициенты автокорреляции на сдвигах, отличных от 0. Здесь заблаговременность прогноза определяется как сдвиг, при котором коэффициент автокорреляции наиболее значим. Автопрогноз выполняется на основе модели авторегрессии 1-го порядка: $T_{i+k} = a_1 T_i + a_0 + \varepsilon$,

где k – заблаговременность прогноза (если $k = 2$, то заблаговременность прогноза составляет 2 года). Данная модель авторегрессии строится с помощью инструмента «Регрессия» пакета «Анализ данных» табличного процессора Microsoft Excel. В качестве независимой переменной берется исходный ряд, обрезанный с конца на значение заблаговременности прогноза, в качестве

зависимой – исходный ряд, обрезанный с начала на значение заблаговременности прогноза.

3 Результаты расчетов и их обсуждение

В таблице 3 представлены результаты первичной статистической обработки годовых значений температуры поверхности моря в 10 точках за период с 1966 по 2019 гг., а также результаты первичной статистической обработки годовых значений аномалий температуры поверхности моря за период с 1870 по 2014 гг. (среднее значение, дисперсия, эксцесс, асимметрия) во всех точках.

Таблица 3. Первичные статистики годовых значений температуры поверхности моря за период с 1966 по 2019 гг.

	№ точки										море в целом
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Среднее значение	0,29	7,55	5,35	3,69	7,83	8,84	8,96	7,60	8,38	3,84	-0,70
Дисперсия	1,54	1,12	1,15	1,34	0,89	0,64	0,58	1,16	0,51	2,13	0,35
Эксцесс	-0,50	3,69	-0,49	-0,65	-0,61	0,61	-0,30	3,65	3,60	0,36	-0,34
Асимметрия	-0,20	-1,64	-0,40	-0,30	-0,17	-0,50	-0,14	-1,61	-1,01	-0,75	-0,15

Наибольшее среднее значение температуры поверхности Балтийского моря за период с 1966 по 2019 гг. выявлено в точке №7 с координатами 57° с.ш., 18° в.д. вблизи южной оконечности острова Готланд в центральной части моря. А наименьшее среднее значение температуры поверхности Балтийского моря за этот же период – в точке №1 с координатами 65° с.ш., 25° в.д. вблизи острова Хайлуото в восточной части Ботнического залива. Как было сказано выше, наименьших значений температура вод Балтийского моря достигает в Ботническом заливе, что связано с усилением апвеллинга и проходящим на юг течением у берегов Швеции.

По дисперсии определяется среднее рассеяние значений ряда от среднего значения данного ряда. Так наименьшего среднего рассеяния температура поверхности Балтийского моря за период с 1966 по 2019 гг. достигает в точке №9

с координатами 58° с.ш., 20° в.д. в центральной части Балтийского моря, наибольшего – в точке №10 с координатами 63° с.ш., 20° в.д. в центральной части Ботнического залива.

Коэффициенты асимметрии во всех десяти исследуемых точках меньше нуля, что означает, что во всех точках значения поверхностной температуры смещены влево от среднего значения. Больше всего это заметно в точке №2 с координатами 60° с.ш., 20° в.д. вблизи Аландских островов в южной части Ботнического залива.

По величине эксцесса определяется крутость кривой распределения температуры поверхности вод Балтийского моря, точнее – отклонение крутости эмпирической кривой от нормальной кривой распределения. В точках № 2, 6, 8, 9 и 10 эксцесс больше нуля, а значит, эмпирическая кривая распределения поверхностной температуры в этих точках более островершинна по сравнению с нормальной кривой распределения. В точках № 1, 3, 4, 5 и 7 эксцесс меньше нуля, а эмпирическая кривая распределения поверхностной температуры в этих точках соответственно более плосковершинна по сравнению с нормальной кривой распределения.

Далее была проведена проверка данных на соответствие нормальному закону распределения. Температура поверхности моря меняется под влиянием различных факторов: адвекции, радиационного баланса, испарения, турбулентного обмена с атмосферой и т.д. Степень влияния этих факторов зависит от расположения точки на земном шаре. Однако бывает так, что влияние всех факторов равнозначно, мало и случайным образом разнонаправлено. Тогда, несмотря на любые изменения, характеристика стремится к своему среднему значению. График функции распределения такого ряда имеет форму колокола. Это и есть нормальный закон распределения.

Для расчета эмпирической функции распределения (ЭФР) и проверки её на соответствие нормальному закону распределения с помощью критерия Пирсона каждый ряд среднегодовых значений был разделён на 9 интервалов по формуле

$k_{max} \simeq 5 \lg n$ (n – длина ряда). Соответственно, степени свободы для расчета $\chi^2_{кр}$ составили 0.05 и 6.

Таблица 4. Проверка годовых значений температуры поверхности моря за период с 1966 по 2019 гг. на соответствие нормальному закону распределения

	точка1	точка2	точка3	точка4	точка5	точка6	точка7	точка8	точка9	точка10
χ^2	<u>2,96</u>	51,30	<u>4,28</u>	13,05	19,79	<u>5,24</u>	<u>4,07</u>	49,78	51,02	<u>6,86</u>
$\chi^2_{кр}$	12,59									

Как показал анализ, ЭФР соответствует нормальному закону распределения в точках №1, 3, 6, 7 и 10. В этих точках влияние внешних факторов на температуру поверхности моря с 1966 по 2019 гг. было незначительным, а, следовательно, температура в этот период стремилась к своим средним значениям. В точках №2, 4, 5, 8 и 9 ЭФР не соответствует нормальному закону распределения, что означает, что в этих точках есть преобладающие факторы, оказывающие влияние на температуру. В точке №2 с координатами 60° с.ш., 20° в.д. вблизи Аландских островов основными влияющими факторами являются апвеллинг со стороны Швеции и холодное течение, проходящее вдоль берегов Швеции. В точке № 4 в районе Санкт-Петербурга основным влияющим фактором является большой сток рек, в частности Невы. А также в точках № 4, 5, 8 и 10 большое влияние на температуру поверхности моря оказывает радиационный баланс.

Далее был проведен корреляционный анализ данных. Корреляционный анализ температуры поверхности Балтийского моря во всех десяти точках произведен с помощью инструмента «Корреляция», входящего в пакет «Анализ данных» табличного процессора Microsoft Excel (табл. 5). Тем же способом произведен корреляционный анализ температуры одновременно всех десяти точек и среднегодовой температуры поверхности Балтийского моря с 1966 по 2014 гг. (табл. 6). В обеих таблицах наибольший по модулю коэффициент корреляции выделен красным цветом, наименьший – жёлтым [12].

Таблица 5. Корреляционная матрица годовых значений температуры поверхности моря за период с 1966 по 2019 гг.

	точка1	точка2	точка3	точка4	точка5	точка6	точка7	точка8	точка9	точка10
точка1	1									
точка2	0,70	1								
точка3	0,89	0,80	1							
точка4	0,88	0,65	0,94	1						
точка5	0,68	0,62	0,87	0,86	1					
точка6	0,76	0,79	0,84	0,76	0,77	1				
точка7	0,79	0,82	0,88	0,79	0,81	0,92	1			
точка8	0,59	0,95	0,75	0,60	0,63	0,78	0,78	1		
точка9	0,74	0,92	0,86	0,75	0,76	0,89	0,94	0,90	1	
точка10	0,69	0,89	0,79	0,66	0,63	0,79	0,79	0,86	0,83	1

Из табл. 5 видно, что наибольший коэффициент корреляции выявлен между данными в точках № 2 и 8 ($r = 0,95$), то есть между температурой поверхности моря вблизи Аландских островов и в Рижском заливе соответственно. Как показала точечная диаграмма, эллипс рассеяния имеет форму «огурца», что означает, что связь между температурой в точках № 2 и 8 линейная стохастическая.

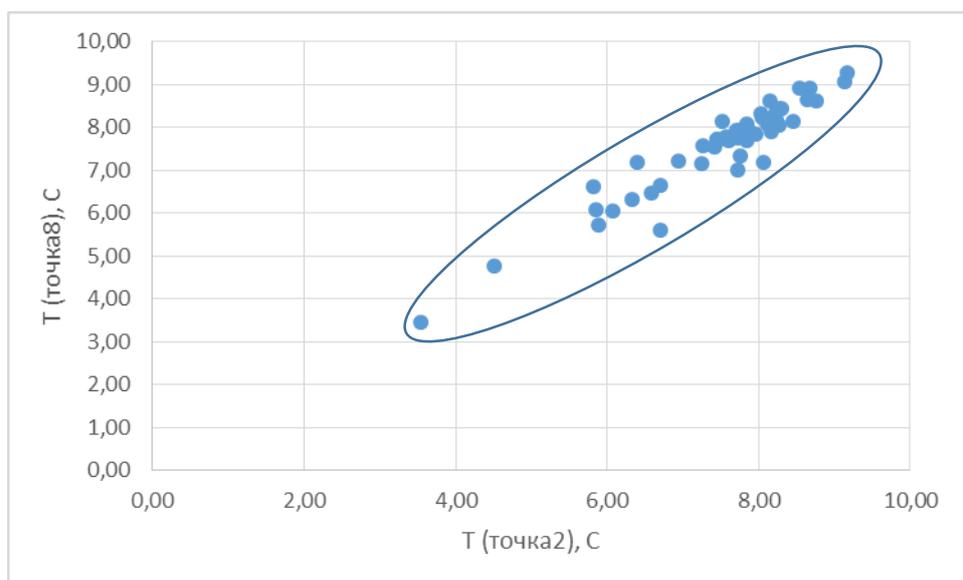


Рисунок 5. Связь между данными в точках № 2 и 8.

Наименьший по модулю коэффициент корреляции выявлен между данными в точках № 1 и 8 ($r = 0,59$), то есть между температурой поверхности моря вблизи острова Хайлуото и в Рижском заливе соответственно. Как показала точечная диаграмма, эллипс рассеяния имеет форму «огурца», что означает, что связь между температурой в точках № 1 и 8 линейная стохастическая.

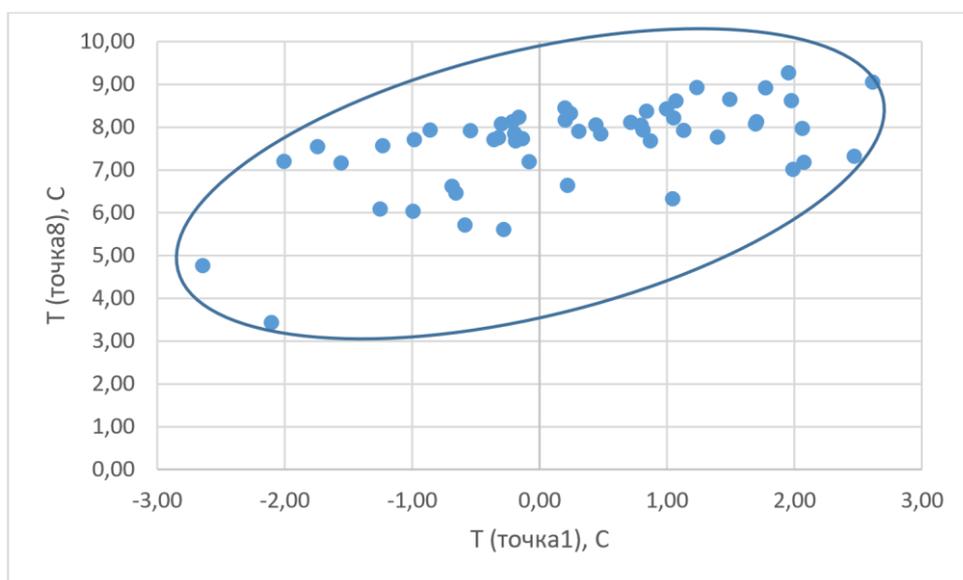


Рисунок 6. Связь между данными в точках № 1 и 8

Далее с помощью $r_{кр}$ все коэффициенты корреляции были проверены на значимость. Как показал анализ, все коэффициенты корреляции в табл. 5 статистически значимы, что означает, что между данными во всех десяти точках существует статистически значимая прямая связь ($r_{кр} = 0,277$ для табл. 5 и $0,292$ для табл. 6). Следует отметить, что значение многих коэффициентов корреляции превышает $0,80$, что означает высокую территориальную связность межгодовых колебаний ТПМ, которые происходят синхронно.

Что касается корреляционного анализа аномалий температуры поверхности Балтийского моря в десяти точках и одновременно среднегодовой поверхностной температуры поверхности всего Балтийского моря за 1966 – 2014 гг., то здесь делается то же самое, что и для корреляционного анализа данных в десяти точках.

Таблица 6. Корреляционная матрица среднегодовой поверхностной температуры поверхности всего Балтийского моря за 1966 – 2014 гг. и аномалий среднегодовой температуры поверхности Балтийского моря за период с 1870 по 2014 гг.

	точка1	точка2	точка3	точка4	точка5	точка6	точка7	точка8	точка9	точка10	море в целом
точка1	1										
точка2	0,65	1									
точка3	0,87	0,77	1								
точка4	0,86	0,60	0,94	1							
точка5	0,64	0,56	0,85	0,83	1						
точка6	0,73	0,76	0,82	0,73	0,74	1					
точка7	0,76	0,80	0,87	0,77	0,79	0,90	1				
точка8	0,52	0,94	0,71	0,53	0,57	0,74	0,73	1			
точка9	0,69	0,91	0,84	0,71	0,72	0,86	0,92	0,88	1		
точка10	0,65	0,88	0,77	0,62	0,59	0,78	0,78	0,85	0,83	1	
море в целом	0,82	0,84	0,87	0,77	0,74	0,88	0,94	0,78	0,89	0,82	1

Как показал корреляционный анализ, все коэффициенты корреляции значимые. Самая высокая почти функциональная связь ($r=0,94$) отмечается между температурными аномалиями всего моря с ТПМ в точке 9, т.е. в центре моря севернее о. Гогланд.

Далее был проведен анализ трендов. В табл. 9 и 10 даются результаты расчета линейного и нелинейного трендов в каждой точке. Более значимые вклады трендов в дисперсию исходных данных в табл. 8 выделены красным цветом.

Таблица 7. Оценки характеристик линейного тренда для каждой точки за период с 1966 по 2019 гг. и всего моря за период с 1870 по 2014 гг.

	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6	точка 7	точка 8	точка 9	точка 10	море в целом

a, °C/год	0,048	0,027	0,041	0,044	0,033	0,027	0,035	0,021	0,025	0,036	0,007
b, °C/год	1,043	6,809	4,227	2,469	6,923	8,096	8,008	7,023	7,691	2,843	-1,246
r	0,616	0,402	0,599	0,604	0,553	0,532	0,717	0,307	0,556	0,389	0,523
r ²	0,380	0,161	0,358	0,364	0,306	0,283	0,514	0,094	0,309	0,151	0,274
r ² _{норм}	0,368	0,145	0,346	0,352	0,293	0,270	0,505	0,077	0,296	0,135	0,269
Tr, °C/10 лет	0,48	0,27	0,41	0,44	0,33	0,27	0,35	0,21	0,25	0,36	0,07

Расчет линейного тренда для десяти точек за 1966 – 2019 гг. показал, что их вклад в дисперсию исходных данных составил от 7,7 % (точка 8) до 50,5 % (точка 7), а для всего моря за 1870 – 2014 гг. – 26.9 %. В точке 8 в Рижском заливе температура с каждым десятилетием увеличивалась в среднем на 0,21 °С, а в точке 7 вблизи южной оконечности острова Готланд – увеличивалась в среднем на 0,35 °С, что больше в 1,7 раза. Что касается всего моря, то здесь температура с каждым десятилетием увеличивалась в среднем на 0,07 °С. Выявленные различия значений вклада линейных трендов в изменчивость поверхностной температуры в десяти точках, вероятнее всего, связаны с особенностями географического положения этих точек и крупномасштабной циркуляции водных и воздушных масс, а также с прибрежным апвеллингом в Ботническом заливе и в западной части Балтийского моря.

Таблица 8. Расчет нелинейного тренда для каждой точки за период с 1966 по 2019 гг. и всего моря за период с 1870 по 2014 гг.

	№ точки										море в целом
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
a, °C/год	-0,037	-0,06	-0,0004	0,009	0,025	-0,020	0,007	-0,074	-0,018	-0,043	-0,004
b, °C/год	0,002	0,002	-0,001	0,001	0,0001	0,001	0,0004	0,002	0,001	0,001	0,0001

с, °С/год	-0,241	7,625	4,612	2,802	6,997	8,537	8,263	7,913	8,092	3,583	-0,963
r	0,675	0,520	0,618	0,616	0,554	0,582	0,731	0,468	0,606	0,445	0,564
r ²	0,456	0,271	0,382	0,380	0,307	0,339	0,535	0,219	0,367	0,198	0,318
r ² _{норм}	0,434	0,242	0,358	0,355	0,280	0,313	0,517	0,188	0,342	0,167	0,308
Tr, °С/10 лет	-0,37	-0,6	-0,004	0,09	0,25	-0,2	0,07	-0,74	-0,18	-0,43	-0,04

Расчет квадратичного тренда для десяти точек за 1966 – 2019 гг. показал, что их вклад в дисперсию исходных данных составил от 18,8 % (точка 8) до 51,7 % (точка 7), а для всего моря за 1870 – 2014 гг. – 30,8 %. В точке 8 в Рижском заливе температура с каждым десятилетием в среднем уменьшалась на 0,74 °С, а в точке 7 вблизи южной оконечности острова Готланд – увеличивалась в среднем на 0,07 °С. Что касается всего моря, то здесь температура с каждым десятилетием уменьшалась в среднем на 0,04 °С. Выявленные различия значений вклада нелинейных трендов в изменчивость поверхностной температуры в десяти точках, вероятнее всего, связаны с особенностями географического положения этих точек и крупномасштабной циркуляции водных и воздушных масс, а также с прибрежным апвеллингом в Ботническом заливе и в западной части Балтийского моря. В точках № 1, 2 и 8 вклад нелинейного тренда в дисперсию исходных данных отличается от вклада линейного тренда более чем на 5 %, а следовательно при дальнейшем анализе данных в этих точках удаляется нелинейный тренд. В остальных точках тренда нет, а следовательно при дальнейшем анализе данных удаляется среднее значение.

После удаления средних значений был проведен гармонический анализ данных. Поскольку все гармоники во всех десяти точках за 1966 – 2019 гг. и в море за 1870 – 2014 гг. по критерию Стьюдента оказались незначимы, то во всех случаях восстановить исходный ряд по сумме гармоник оказалось невозможно.

Далее был проведен автокорреляционный анализ данных (табл. 9).

Таблица 9. Автокорреляционный анализ температуры поверхности Балтийского моря в точках 1 – 7 за 1966 – 2019 гг. и проверка авторегрессионной модели на адекватность

	точка1	точка2	точка3	точка4	точка5	точка6	точка7
$\tau^2_{кор}$	отсутствует	4	4	4	4	4	отсутствует
$\tau_{пер}$	2	7	9	8	8	8	7
Тип процесса	простая цепь Маркова 1-го порядка						
k	2	1	1	8	8	1	1

Таблица 4. Автокорреляционный анализ температуры поверхности Балтийского моря в точках 8 - 10 за 1966 - 2019 гг. и поверхности Балтийского моря за 1870 – 2014 гг. и проверка авторегрессионной модели на адекватность

	точка8	точка9	точка10	море в целом
$\tau_{кор}^2$	3	5	4	отсутствует
$\tau_{пер}$	7	7	8	6
тип процесса	простая цепь Маркова 1-го порядка	смешанный (простая цепь Маркова 1-го порядка красный шум)	простая цепь + Маркова 1-го порядка	простая цепь Маркова 1-го порядка
k	1	1	1	1

Результаты автокорреляционного анализа показали, что в точках №1 и 7 АКФ ни разу не пересекает нуль, то есть межгодовая изменчивость поверхностной температуры воды в этих точках является неинерционным процессом. Что касается всего моря, то здесь АКФ также не пересекает нуль, и процесс изменчивости поверхностной температуры всего моря за 1870 – 2014 гг. также является неинерционным. В точке № 8 АКФ пересекает нуль на сдвиге $\tau = 3$ – здесь процесс изменчивости поверхностной температуры воды малоинерционный. В точке № 9 процесс считается инерционным, так как $\tau_{кор}^2 = 5$. Во всех остальных точках $\tau_{кор}^2 = 4$ и процесс изменчивости поверхностной температуры воды за 1966 – 2019 гг. также считается инерционным.

По результатам анализа на периодичность наибольшая периодичность выявлена в точке № 3 – здесь локальный максимум расположен на сдвиге $\tau = 9$ и соответственно период циклического колебания составляет 9 лет. Чуть меньше период циклического колебания составляет в точках № 4, 5, 6 и 10 (8 лет) и в точках № 2, 7, 8, 9 (7 лет). Наименьший период циклического колебания выявлен в точке № 1 и оценивается в 2 года. Что касается всего моря, то здесь период циклического колебания составляет 6 лет.

Тип процесса межгодовой изменчивости поверхностной температуры в большинстве рассмотренных случаев оценивается как «простая цепь Маркова 1-го порядка, так как во всех рассмотренных случаях на сдвиге $\tau = 1$ АКФ имеет значимый коэффициент автокорреляции. Следует отметить, что в точке № 9 тип процесса оценивается как «смешанный (простая цепь Маркова 1-го порядка + красный шум)», так как в этой точке достаточно высокая инерционность ($\tau_{\text{кор}}^2 = 5$).

Поскольку ни в одном рассмотренном случае АКФ не представляет собой «белый шум» и на всех сдвигах, отличных от нуля, коэффициенты автокорреляции статистически значимы, то во всех случаях заблаговременность прогноза была определена по сдвигу, при котором коэффициент автокорреляции наиболее значим. Наибольшая заблаговременность прогноза выявлена в точках № 4 и 5 (8 лет). В точке № 1 заблаговременность прогноза оценивается в 2 года, в остальных точках – в 1 год. Во всем море заблаговременность прогноза также оценивается в 1 год.

Заключение

В ходе данной выпускной квалификационной работы был проведен сравнительный анализ научных публикаций на тему «Климатическая изменчивость температуры поверхности в Балтийском море». В ходе анализа этих публикаций сделаны следующие выводы:

- Начиная с 1900 г. и по настоящее время температура воды на поверхности Балтийского моря испытывала периоды повышения и понижения, причем периоды повышения температуры преобладали [12], [10].
- В период с 1900 по 2020 гг. температура поверхности Балтийского моря в течение каждого десятилетия увеличивалась за счет тренда в среднем на 0,12 °С [10];
- В заливах и прибрежной части Балтийского моря ТПМ растет быстрее, чем в открытом море [12], [3];
- У восточного побережья Балтийского моря температура воды выше, чем у западного [12], [3], [10], [11];
- Максимальная температура воды в Балтийском море наблюдается в августе, минимальная – в январе [3].

Исходя из результатов статистического анализа межгодовой изменчивости температуры поверхности Балтийского моря, можно сделать следующие выводы:

- Наибольший прогрев поверхностных вод Балтийского моря наблюдается в июле-августе, наибольшее охлаждение – в феврале-марте;
- Минимальная температура поверхностных вод Балтийского моря наблюдается в прибрежной зоне северной части моря и составляет меньше 0 °С; максимальная температура поверхностных вод наблюдается в юго-западной части моря и составляет 18 °С;
- Наибольшее среднее значение поверхностной температуры Балтийского моря за период с 1966 по 2019 гг. выявлено в районе южной

оконечности острова Готланд; наименьшее среднее значение поверхностной температуры вод Балтийского моря за этот же период выявлено в восточной части Ботнического залива;

- Температура поверхностных вод Балтийского моря за период с 1966 по 2019 гг. распределена по нормальному закону в Финском и Ботническом заливах, а также в районе южных оконечностях островов Готланд и Борнхольм;

- Показана высокая территориальная связность межгодовых колебаний ТПМ, которые происходят синхронно на всей акватории моря.

- Наибольший вклад линейного и нелинейного трендов в дисперсию годовых значений температуры воды выявлен в южной оконечности острова Готланд, наименьший – в районе Калининградской области;

- Максимальная заблаговременность автопрогноза поверхностной температуры выявлена в районе Калининградской области и в Финском заливе в районе устья Невы, которая составляет 8 лет.

Литература

1. Гидрогеология и гидрохимия морей СССР. Том 3. Балтийское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. 1992. С. 8 – 306
2. Лебедев С.А. Климатические изменения температуры поверхности и уровня Балтийского моря по данным дистанционного зондирования//Янтарный мост. Журнал региональных исследований. 2014. №1. С. 78 – 95
3. Котлярова М.А., Буканова Т.В. Изменчивость температуры поверхности юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным//Научный журнал «Известия КГТУ», № 53, 2019 г.
4. Мысленков С.А. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термоксы//С. А. Мысленков, В. А. Кречик, Д. М. Соловьев // Труды Гидрометеорологического научноисследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 364. С. 159 – 169
5. Стонт Ж.И., Буканова Т.В., Крек Е.В. Изменчивость климатических характеристик прибрежной части юго-восточной Балтики в начале 21 в. //Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2020. № 1. С. 81 – 94
6. Абрамов Р.В., Гуцин О.А., Навроцкая С.Е., Стонт Ж.И. Гидрометеорологический мониторинг побережья юго-восточной Балтики в 1996 – 2010 гг// ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2013, № 1. С. 54 –61
7. Стонт Ж.И. Современные тенденции изменчивости гидрометеорологических параметров в юго-восточной части Балтийского моря и их отражение в прибрежных процессах (АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук)
8. Стонт Ж.И., Навроцкая С.Е., Чубаренко Б.В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в

Калининградском регионе// Стонт Ж.И., Навроцкая С.Е., Чубаренко Б.В. Океанологические исследования. 2020. Т. 48, № 1. С. 45 – 61

9. Стонт Ж.И., Дубравин В.Ф., Капустина М.В. Эволюции (сезонная и межгодовая изменчивость) суточного хода гидрометеорологических полей южной Балтики// Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2018. № 3. С. 35 – 54

10. Бойцов В.Д. Долгопериодная изменчивость температуры поверхности Северного и Балтийского морей в 1900—2020 гг.

11. Серых И.В., Костяной А.Г. О климатических изменениях температуры Балтийского моря//Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 6 – 7

12. Гордеева С.М. Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации». – СПб, изд. РГГМУ, 2017. С. 8 – 60

13. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник, – издание 2, испр. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2020. С. 135

