

На правах рукописи

ЛОЖКИН Дмитрий Михайлович

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ И
ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЙ ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАНАЛИЗА ERA5**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

г. Южно-Сахалинск – 2022

Работа выполнена в Сахалинском филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («СахНИРО»).

Научный руководитель:

Шевченко Георгий Владимирович,

доктор физико-математических наук, Сахалинский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Южно-Сахалинск, заведующий лабораторией океанографии.

Официальные оппоненты:

Белоненко Татьяна Васильевна,

профессор, доктор географических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург, профессор кафедры океанологии.

Лаврова Ольга Юрьевна,

доцент, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник лаборатории аэрокосмической радиолокации.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток

Защита диссертации состоится «24» мая 2022 г. в 16-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 693022, Сахалинская область, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 1Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайте: www.imgg.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте www.imgg.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс (8 4242) 791-517, E-mail: andreeva-mu@mail.ru, ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д999.004.03,
кандидат физико-математических наук

М.Ю. Андреева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Исследование термического режима различных акваторий является одной из важнейших океанологических задач, так как пространственно-временная изменчивость температуры воды отражает сложные процессы формирования, трансформации и динамики водных масс. Помимо этого, температура является одним из ключевых параметров, определяющих условия существования и развития большинства видов гидробионтов, поэтому изучение данной проблемы имеет также ключевое значение для гидробиологии. Районирование акваторий по характеру температурных условий, а также их прогнозирование с учетом особенностей сезонной и межгодовой изменчивости является важной научной задачей, имеющей также и выраженный прикладной аспект, связанный с тем обстоятельством, что к зонам раздела водных масс с различными характеристиками приурочены скопления некоторых видов промысловых рыб.

В последние годы на фоне постоянного сокращения числа морских научно-исследовательских рейсов в большинстве стран, включая прекращение регулярных исследований Росгидромета на стандартных океанологических разрезах более 30 лет назад, большое внимание уделяется развитию как альтернативных контактных (система поверхностных дрейфтеров и всплывающих буев АРГО выполняет порядка 100000 STD станций ежегодно, что позволило накопить большие массивы данных наблюдений, дополняющие материалы судовых съемок), так и дистанционных спутниковых наблюдений. Однако для морей, омывающих берега России, включая Охотское море и северную часть Японского, ввиду негативного влияния на буи ледяного покрова, основным источником данных о термических условиях являются спутниковые наблюдения. Их очевидными преимуществами является регулярный характер наблюдений и полнота охвата изучаемой акватории, что в определенной мере компенсирует тот недостаток, что они отражают условия сравнительно тонкого поверхностного слоя. В научной печати регулярно появляется большое число работ, посвященных различным аспектам пространственно-временной изменчивости температуры поверхности океана (ТПО), чего, однако, нельзя сказать о таком важном в промысловом отношении бассейне, как Охотское море, которое отличается к тому же сложным характером термического режима [Гидрометеорология ..., 1998]. Прежде всего, здесь следует отметить работу [Belkin & Cornillon, 2004], посвященную выделению термических фронтов на его акватории.

Данные спутниковых наблюдений за поверхностью Охотского моря за 1992-1995 гг. анализировались также в работе [Богданов, 1997], основное внимание в которой было сосредоточено на оценке скорости его прогресса и ее межгодовой изменчивости. Сезонные колебания ТПО с применением метода естественных ортогональных функций (ЕОФ) анализировались в [Пузанков, Шевченко, 2001; Новиненко, Шевченко, 2007]. В последней из указанных работ особенности пространственно-временной изменчивости ТПО рассматривались на основе 10-летнего ряда наблюдений для акватории Охотского моря, северная часть Японского моря и прилегающая к Курильским островам северо-западная часть Тихого океана (СЗТО) не учитывались. Были выявлены основные особенности пространственного распределения четырех старших мод ЕОФ, для отдельных частей изучаемой акватории (юго-восточный шельф о. Сахалин, южные Курильские острова) подобные исследования были выполнены в [Шевченко и др., 2020; 2021]. В данной работе анализ выполнен для всего района, в котором накапливались материалы спутниковых наблюдений, и по более продолжительному интервалу времени (23 года), что позволило более детально изучить пространственно-временную изменчивость ТПО, включая межгодовые вариации термического режима.

Столь малое число работ, посвященных анализу термических условий данного бассейна по спутниковым данным, обусловлено, скорее всего, значительными пропусками в материалах наблюдений, обусловленных влиянием облачности. Как отмечалось в [Пузанков, Шевченко, 2001], на большей его части количество среднесуточных значений ТПО составляло 20-25% от их возможно-го числа, и только в северной его части несколько увеличивалось.

Хотя по Охотскому морю накоплен значительный объем экспедиционных исследований, и количество СТД-станций составляет десятки тысяч [Гидрология..., 1998; Luchin et al., 2004; Лучин, 2009], они крайне неравномерно распределены по его акватории, а также по сезонам – в холодный период года из-за наличия ледяного покрова и сложных погодных условий количество съемок невелико. Указанные обстоятельства делают задачу изучения пространственно-временной структуры температуры воды весьма сложной, поэтому в [Гидрология..., 1998] приведено лишь качественное описание сезонного хода, без применения методов статистического анализа.

Климатическим изменениям в дальневосточных морях и северо-западной части Тихого океана посвящен ряд исследований, в которых рассматривались как данные судовых океанологических съемок и доступных архивов метеорологической информации [Хен и др., 2004; 2008; Глебова и др., 2009; Зуенко и др., 2019], так и материалы четырехсрочных измерений температуры морской воды на береговых гидрометеорологических станциях Росгидромета [Ростов и др., 2017, 2018]. В большинстве этих работ отмечалась тенденция к повышению температуры воды в дальневосточных морях, обусловленная, прежде всего, изменениями в приземном слое атмосферы в регионе, а также обсуждались некоторые ситуации, когда отклонения термических условий от нормы были наиболее существенными. Отдельно отметим работу [Ustinova, 2021], посвященную значимым отклонениям термических условий от средних многолетних значений («термическим катастрофам») и их влиянию на промысел некоторых видов рыб, в частности сайры, а также на особенности формирования ледяного покрова в дальневосточных морях.

В целом, основные отличительные черты термического режима поверхностного слоя вод Охотского моря – такие как более теплые условия в его юго-западной части и более холодные в зонах апвеллинга в районе банки Кашеварова, Ямских островов, Средних Курил и т.д., достаточно хорошо известны и подробно описаны в [Luchin et al., 2004; Веселова, 1972]. В то же время более тонкие особенности сезонного хода как в целом в масштабе всего бассейна, так и на отдельных участках его акватории изучены пока недостаточно и количественно не оценены, соответственно именно эти задачи и составляли основную цель настоящего исследования.

При изучении термического режима любой морской акватории обычно возникает вопрос о наличии однонаправленных тенденций – трендов температуры в масштабах всего бассейна или отдельных его частей. Такой вопрос приобрел особую актуальность вследствие глобального потепления, наблюдающегося на Земле в последние десятилетия, наиболее ярко оно выражается в повышении зимних температур воздуха в северных районах (на широтах выше 60° с.ш. [State..., 2018]). Следствием этого процесса является существенное снижение ледовитости (площади акватории, покрытой льдом) Северного Ледовитого океана [Jeffries et al., 2013]. Снижение ледовитости наблюдается с 1995 года и на акватории Охотского моря [Пищальник и др., 2016]. Это снижение обусловлено тем же процессом повышения зимних температур в Арктике, так как именно вли-

яние холодных воздушных масс, приносимых на его акваторию характерными для зимнего муссона ветрами северного и северо-западного румбов, определяет условия льдообразования в данном бассейне.

Ранее было высказано предположение, что во втором десятилетии XXI века процесс льдообразования усилится [Хен и др., 2004], однако по данным JMA [www.data.jma.go.jp (дата обращения 10 июля 2019 г.)] тенденция на снижение ледовитости сохраняется до сих пор. Однако роль этого процесса в формировании термического режима Охотского моря пока не изучена, при этом не вызывает сомнений, что он оказывает существенное влияние не только на температуру поверхностного слоя, но и на формирование солёности, на циркуляцию. В свою очередь такие изменения очень важны как для гидробиологической науки, так и для промысла некоторых видов рыб и беспозвоночных.

Температура морской воды, колеблющаяся в гораздо более узких пределах, чем температура атмосферного воздуха, определяет и возможность существования морских организмов в данных условиях, и быстроту их развития. Равномерность, плавность вариаций температуры воды и ее относительная однородность в каждой конкретной акватории - это один из благоприятных факторов их существования, так как они испытывают меньший стресс при изменениях условий обитания. Вместе с тем в жизни морских организмов, в особенности на ранних периодах их развития, температура приобретает особое значение, потому что большинство их холоднокровны, т. е. находятся в существенной зависимости от теплового режима окружающей среды. Это в полной мере относится к молоди большинства промысловых рыб, в том числе такого важного в экономике Дальневосточного региона объекта, как тихоокеанские лососи. Известно, что многие виды крабов очень чувствительны к термическим условиям, и мигрируют из мест привычного обитания в другие районы при их значимых изменениях.

Представления о циклическом характере изменений климата и биоты дают возможность усовершенствовать режим эксплуатации промысловых запасов, показывая в какой фазе долгопериодного цикла – на спаде или подъеме численности – находится промысловая популяция [Кляшторин, Лябушин, 2005].

Спутниковые наблюдения за температурой поверхности моря, важность которых в последние годы существенно возросла из-за значительного сокращения морских экспедиционных исследований, предоставляют собой источник регулярных данных, охватывающих всю акваторию изучаемого бассейна. Это позволяет эффективно использовать их для изучения сезонных и межгодовых вариаций температуры поверхностного слоя, в частности, для выявления трендов и циклических составляющих как в целом, так и в отдельных его частях. Для проведения этих исследований, а также с целью мониторинга условий обитания водных биологических ресурсов в 1997 в Сахалинском филиале ВНИРО (тогда СахНИРО) была установлена приемная спутниковая станция TeгаScan, зона уверенного приема которой охватывала акваторию Охотского моря, северную часть Японского моря и прилегающую к Курильским островам часть СЗТО. Эта производственная задача и определила выбор района исследования, хотя для этого имеются и сугубо научные основания, так как указанные акватории тесно связаны между собой благодаря интенсивному водообмену через проливы, и происходящие в них процессы следует изучать в рамках единого подхода.

Для изучения факторов, влияющих на формирование термического режима, привлекались данные реанализа ERA5 по потоку коротковолновой солнечной радиации, приземному атмосферному давлению (определяющему характер атмосферной циркуляции), и ТПО.

Целью работы является анализ пространственно-временной изменчивости температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по данным спутниковых наблюдений и реанализа за 1998-2020 гг., выявление особенностей сезонных вариаций, однонаправленных тенденций и периодических колебаний, оценка возможности прогнозирования ТПО и связей с другими параметрами окружающей среды, выявление значимых отклонений от средних многолетних значений.

Для достижения сформулированной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформировать информационную базу исследования, включающую в себя спутниковые данные по температуре поверхности и ледовитости Охотского моря и прилегающих акваторий, а также данные реанализа ERA5 по ТПО, потоку коротковолновой солнечной радиации, а также приземному атмосферному давлению;

2. Разработать программное обеспечение для работы с созданной базой данных, расчета и визуализации статистических характеристик (программный комплекс BIN_READ);

3. Рассчитать и визуализировать статистические параметры и выполнить ЕОФ-анализ пространственно-временной изменчивости ТПО, потока коротковолновой солнечной радиации и приземного атмосферного давления;

4. Дать физическую интерпретацию выявленным статистическим закономерностям;

5. Проанализировать термические условия среды обитания водных биологических ресурсов. В том числе:

- в период выпуска молоди лососевых рыб у побережья Сахалина
- в период нагульных миграций и нерестовых подходов тихоокеанских лососей
- в период промысла и нереста минтая в Охотском море
- в период размножения и роста других видов рыб и промысловых беспозвоночных.

Научная новизна

В работе получен ряд новых научных результатов:

1. Особенности термического режима поверхностного слоя в изучаемом районе описываются первой модой разложения полей ТПО по ЕОФ, имеющей сравнительно однородное распределение в Охотском море (с более низкими значениями в зонах квазистационарных апвеллингов) и более высокие значения в более теплых северной части Японского моря и СЗТО. Ее временная функция имеет выраженный годовой ход с амплитудой 0.9°C .

2. В последнее 20-летие наблюдается снижение температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий. Наиболее значимы отрицательные тренды весной (скорость снижения $0.5\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) в северной и западной частях изучаемого бассейна, а также в северной части Татарского пролива Японского моря, что позволяет связать наблюдаемую тенденцию с уменьшением ледовитости и увеличением глубины зимней конвекции и рассматривать этот процесс как реакцию на глобальное потепление.

3. При анализе пространственного распределения амплитуды годовой гармоники приземного атмосферного давления (ПАД) выявлена узкая область с низкими значениями, разделяющая зоны с различным характером годовых вариаций над материком (максимум зимой, минимум летом) и Тихим океаном (противоположная динамика). Вблизи восточного побережья Сахалина имеется

точка, в окрестности которой фаза этой составляющей изменятся на 360°- аналог амфидромии в теории приливов. При этом над материком фаза изменяется слабо, а вдоль границы раздела между областями с различным характером годового хода ПАД – очень резко.

Основные положения

1. На основе гармонического анализа и разложения по ЕОФ температуры поверхности Охотского моря на фоне среднего для моря статистически значимого годового хода выявлена сезонная «волна тепла», распространяющаяся с северо-запада (более ранний, примерно на 1 месяц, прогрев, и более раннее охлаждение) на юго-восток.

2. Межгодовая изменчивость ТПО в Охотском море проявляется в модуляции годового хода. Главную роль в вариациях огибающей по максимальным значениям играет цикличность с периодом 6 лет с амплитудой до 1–2°C в зоне ее влияния (южная половина Охотского моря, северная часть Японского моря и СЗТО).

3. На основе анализа ряда среднемесячных значений коротковолновой солнечной радиации (Short-Wave Radiation – SWR) – основного источника тепла, поступающего в поверхностный слой океана (данные реанализа ERA5 за 1998–2020 гг.) выявлена значимая корреляция с ТПО по северной и северо-западной периферии Охотского моря и более слабая в остальной части изучаемого района. Инсоляция является причиной более раннего прогрева в северо-западной части Охотского моря в июле и формирования квазициклических колебаний с периодом около 11 лет на его северном шельфе.

Практическая ценность работы

В ходе проведения исследований и выполняемых работ по мониторингу условий обитания водных биологических ресурсов, был получен ряд результатов прикладного характера, наиболее важные из которых следующие:

1. Обнаружены значимые положительные аномалии ТПО в СЗТО в зонах зимовки и нагульных миграций тихоокеанских лососей зимой 2020 г. и у восточного побережья Камчатки летом, что могло стать причиной слабых подходов горбуши.

2. В ходе мониторинга нерестовых подходов горбуши к берегам Сахалина выявлено, что значимые аномалии ТПО в прибрежной зоне (как отрицательные, так и положительные) негативно сказываются на ее уловах.

3. Определены средние даты наступления комфортных условий для молоди тихоокеанских лососей (и экстремальные отклонения от них) в районах устьев рек, на которых расположены лососевые рыболовные заводы, регулярно даются рекомендации по срокам выпуска на ЛРЗ.

4. Изучено влияние температурных условий на развитие устриц. Показано, что в аномально теплые годы средние показатели высоты и массы устрицы значительно ниже нормы, а в холодные годы – выше нормы.

5. Температурные условия в Охотском море в районах нереста минтая характеризовались как стабильные, с некоторой тенденцией к снижению в период нереста (апрель – июнь) и активной фотосинтетической деятельностью. Это указывает на устойчивые условия воспроизводства охотоморского минтая в отличие от япономорского.

6. Показана возможность прогнозирования ТПО с годичной заблаговременностью путем расчета в виде комбинации линейного тренда и 3-4 основных циклических составляющих.

7. Разработан программный комплекс BIN_READ для работы с созданной базой данных, расчета и визуализации статистических характеристик.

Достоверность обеспечивается использованием устоявшихся, ранее апробированных подходов и методов исследования (метод наименьших квадратов (МНК), ЕОФ, метод последовательных спектров); высоким качеством спутниковых данных (в работе [Пузанков, Шевченко, 2001] оценена их сопоставимость с данными инструментальных наблюдений) и реанализа; надежными алгоритмами обработки данных; согласованностью результатов с результатами работ других авторов по смежной тематике.

Апробация работы

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, были представлены на международных и всероссийских научных мероприятиях, в том числе: Международной научной конференции PICES (Online Virtual meeting 2020, 2021); XVI, XVII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» (г. Москва, 2018, 2019); XVII Международной конференции по науке и технологиям Россия-Корея-СНГ (г. Южно-Сахалинск, 2017); III, IV международной научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (г. Южно-Сахалинск, 2019, 2021); VII, IX научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса» (г. Москва, 2019, 2021); Круглом столе «Изменение климата, возможные риски и пути адаптации к ним рыболовства» (г. Москва, 2019).

Личный вклад автора

Автор обеспечил создание информационной основы исследования, сформировал базу спутниковых данных по температуре поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий за 1998-2020 гг., а также данных реанализа ERA5 по ТПО, потоку коротковолновой солнечной радиации и приземному атмосферному давлению.

Автор самостоятельно разработал программный комплекс BIN_READ для работы с созданной базой данных, расчета и визуализации статистических характеристик.

Автор рассчитал и визуализировал статистические параметры и выполнил ЕОФ-анализ пространственно-временной изменчивости ТПО, потока коротковолновой солнечной радиации и приземного атмосферного давления.

Вместе с соавторами участвовал в подготовке публикаций по теме работы, обобщении материала и формулировке выводов.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 20 работ, 7 из них – статьи в журналах списка ВАК по специальности 25.00.29, одна глава в монографии.

Структура и объем

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 113 наименований. Работа содержит 159 страниц машинописного текста, 6 таблиц и 83 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определены актуальность темы исследований, цель и новизна работы, практическая ценность, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора.

В **первой главе** сделан обзор литературы, посвященной исследованию ТПО в изучаемой акватории, показано, что спутниковые данные играют все бо-

лее важную роль в анализе пространственно-временной изменчивости данного параметра. Их очевидными преимуществами над данными судовых съемок является регулярный характер наблюдений и полнота охвата изучаемой акватории, что в определенной мере компенсирует тот недостаток, что они отражают условия сравнительно тонкого поверхностного слоя. В **пункте 1.2** приведена океанографическая характеристика района исследования, отдельно рассмотрены гидрологические условия Охотского моря (**пункт 1.2.1**) и северной части Японского моря (**пункт 1.2.2**).

Вторая глава содержит в себе описание материалов и методов исследования. В ней более детально рассмотрены плюсы и минусы различных типов данных: судовых съёмок, спутниковых данных и данных реанализа. В **пункте 2.1** рассмотрены спутниковые данные: их происхождение, способ их получения и способ хранения. В **пункте 2.2** приведено расширенное описание данных реанализа, а также описаны этапы их обработки с момента выбора массива до готовности к анализу. **Пункт 2.3** посвящен программному комплексу BIN_READ, который был создан в процессе написания работы, и большая часть расчетов произведена именно в нем.

В **пункте 2.4** описаны все методы исследования. Для анализа пространственно-временной изменчивости различных параметров окружающей среды, как температуры поверхности океана, так и некоторых других величин были определены средние многолетние значения (нормы) за указанный период (1998-2020 гг.), отклонения от нормы (аномалии), амплитуды и фазы сезонных гармоник, коэффициенты линейного тренда, оценены колебания с периодом от 3 до 11 лет, выполнен прогноз методом последовательных спектров и проведено разложение методом естественных ортогональных функций.

Пункт 2.4.1. Метод наименьших квадратов, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от искомым переменных, широко применяется для решения различных задач. В данном разделе в качестве искомым параметров выступают коэффициенты a и b уравнения $y=ax+b$. Благодаря автоматизации процесса удалось обработать матрицу с размерностью 1000x1022 пространственных ячейки и временной ряд в 23 года. Пространственное разрешение данных также улучшилось (ячейки 2x2 км). Величина скорости изменения температуры (умноженная на 10 и характеризующая, соответственно, прирост температуры за 10 лет) в каждой пространственной ячейке использовались для построения карты, характеризующей динамику термического режима в поверхностном слое в последнее двадцатилетие. Карта строилась в виде изолиний коэффициента a линейного тренда (КЛТ), его знак и величина характеризовались цветом закраски соответствующей области.

Пункт 2.4.2. Для оценки сезонных и межгодовых колебаний в работе используется метод гармонического анализа: в первом случае рассчитываются гармоники с периодом год и меньше, во втором – от 3 до 11 лет. В обоих случаях амплитуда (A) и фаза (φ) определяются методом наименьших квадратов при известном периоде, на выходе получается функция вида $F(t)=A\cos(\omega t-\varphi)$.

Сезонные вариации любого гидрометеорологического параметра в каждой точке можно описать годовой гармоникой и несколькими составляющими с кратными частотами – полугодовой, треть- и четвертьгодовыми составляющими. Построены пространственные распределения вышеуказанных параметров за каждый отдельный год и по средним многолетним данным.

Пункт 2.4.3. В работе [Шершнева, Шевченко, 2005] была разработана методика прогнозирования термических условий на год вперед на отдельных участках изучаемой акватории (эта методика также использовалась для восстановления пропусков данных, связанных с влиянием облачности или техническими причинами), заключающаяся в расчете температуры в заданном квадрате в момент времени t по формуле:

$$F(t) = at + b + \sum_{k=1}^N c_k \cos(\omega_k t - \varphi_k) \quad (1)$$

где a и b – параметры линейного тренда, c_k – амплитуды, а φ_k – фазы циклических составляющих (гармоник) вариаций температуры поверхности моря. Амплитуды и фазы основных циклических составляющих рассчитываются методом наименьших квадратов после вычитания тренда (чтобы избежать влияния низкочастотных компонент с периодом, превышающим половину длины ряда), при этом их периоды перебираются в диапазоне от 18 до 144 месяцев с шагом в один месяц. Для каждой ячейки определялся набор из 3-4 гармоник, дающих наибольший вклад в межгодовые вариации ТПО (вклад оценивался по амплитуде колебания). Поскольку они не являются ортогональными, то для прогноза по формуле (1) необходимо из исходного ряда вычитать рассчитанную волну, прежде чем определять параметры следующей, чтобы избежать двойного включения когерентных составляющих (в работах [Иванов, 2002; Иванов, 2006] такая методика была названа «методом последовательных спектров»).

Пункт 2.4.4. Метод естественных ортогональных функций применяется для обработки и анализа скалярных полей данных, меняющихся во времени, он был основным инструментом исследования в данной работе. Метод расщепляет исходные поля данных на ортогональные составляющие – «моды данных», которые описывают статистически значимые, упорядоченные структуры. Эти моды связаны с собственными значениями, соответствующими масштабу вклада в исходное поле. В отличие от обычного спектрального анализа, где базис определен изначально набором синусов и косинусов, в ЕОФ функции базиса разложения определяются из самих данных и являются оптимальными в статистическом смысле.

Следует подчеркнуть, что статистические моды не всегда имеют физическую интерпретацию. Один и тот же физический процесс может давать вклад в разные моды, и одна и та же мода может быть результатом действия более чем одного физического процесса.

Конечный результат разложения можно представить в виде:

$$F(t, x) = \sum_h T_h(t) X_h(x) \quad (2)$$

где $T_h(t)$ – временная функция, а $X_h(x)$ – пространственное распределение моды h .

Пункт 2.4.5. Для оценки роли циклических составляющих в вариациях временных функций первой и второй мод применялась методика спектрально-временного анализа колебаний (его можно считать разновидностью ставшего популярным в последние годы wave-let анализа) [Ландер и др., 1973]. В этом методе выбирается диапазон исследуемых частот, в котором в логарифмическом масштабе задается набор частот, по которому осуществляется преобразование Фурье полного ряда (за счет этого обеспечивается охват низкочастотной области спектра). В частотной области производится сглаживание, после чего вычисляется обратное преобразо-

вание Фурье. Таким образом, для каждой частоты в заданном наборе получается значение спектральной амплитуды для разных моментов времени. Для снижения роли краевых эффектов, расчет производится по удвоенному массиву данных.

В заключительном **пункте 2.5** данной главы произведено сравнение данных СахНИРО и европейского реанализа (ERA5) по ТПО. Для этого из данных СахНИРО вычитались значения ERA5 для разных сезонов. Показано, что зимой и летом в изучаемой области преобладают отрицательные значения, а значит данные реанализа в эти сезоны выше спутниковых. Осенью и особенно весной картина противоположная, на большей части акватории разности положительны. В целом по году расхождения невелики (рис. 1), за исключением некоторых динамически активных районов – Шантарских островов, зоны влияния стока реки Амур, областей апвеллинга в районе банки Кашеварова, Ямских островов, пролива Лаперуза и т.д. Вероятно, сложность моделирования гидрологических процессов в таких акваториях может приводить к определенным неточностям данных ERA5. Эта особенность проявляется и в пространственном распределении коэффициента корреляции между рядами – на большей части изучаемого района его значения на уровне 0.95 и выше, в районе центральной части Курильской островной гряды и на северо-восточном шельфе о. Сахалин снижаются до 0.85 – 0.9, а в Амурском лимане и вблизи Шантарских островов – до 0.6 – 0.65.

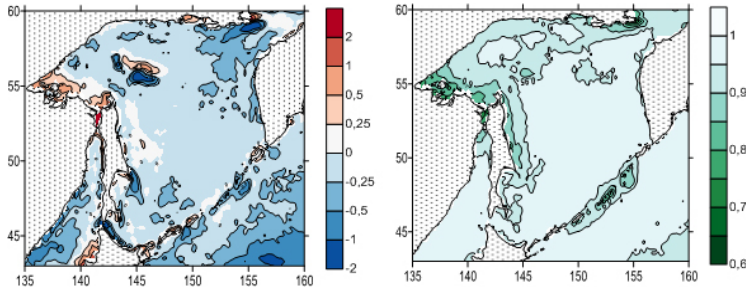


Рис. 1. Разница средних многолетних годовых значений ТПО (слева) и распределение коэффициентов корреляции (справа) между данными СахНИРО и ERA5.

Во временной функции первой моды разложения по ЕОФ не обнаружено устойчивых сезонных вариаций, главную роль играют положительные (в меньшей степени отрицательные) выбросы, указывающие на существенные расхождения в отдельные месяцы, преимущественно летние. Таких ситуаций не так много, около 10 при анализируемом периоде времени в 23 года, наиболее значимые отклонения могут достигать 4–6°C, а на отдельных небольших участках 7–9°C. такие месяцы исключались из анализа аномалий ТПО в СЗТО из-за большой вероятности ошибок.

В **третьей главе** исследована пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий, сначала рассматриваются сезонные вариации (методом гармонического анализа и разложением по естественным ортогональным функциям), затем межгодовые - колебания, выраженные в модуляции годовой гармонике, и однонаправленные тенденции в различные месяцы и сезоны. Далее продемонстрирована возможность прогнозирования температуры поверхностного слоя воды с использованием метода последовательных спектров.

Пункт 3.1.1. Распределение амплитуды годовой гармоники (рис. 2) имеет меридиональную ориентацию, ее значения убывают с запада на восток, минимальные значения отмечены в зонах квазистационарных апвеллингов в районе Средних Курил, Ямских островов, на банке Кашеварова и т.д. Ее фаза возрастает в направлении с северо-запада на юго-восток, что указывает на более ранний прогрев на северо-западном шельфе и более поздний в СЗТО (сдвиг около месяца).

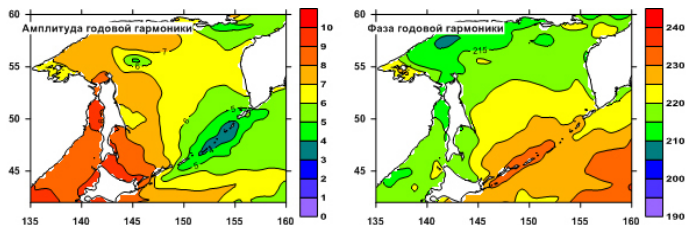


Рис. 2. Амплитуда (в °С) и фаза (в градусах) годовой гармоники ТПО по средним многолетним месячным значениям ERA5.

Пункт 3.1.2. Пространственное распределение первой моды разложения последовательности полей ТПО по ЕОФ (рис. 3) выявило более высокие значения в Японском море, СЗТО и юго-западной части Охотского моря по сравнению с основной его акваторией. Наиболее низкими значениями характеризуются зоны квазистационарных апвеллингов. Ее временная функция имеет выраженный годовой ход с амплитудой годовой гармоники 0.9°C .

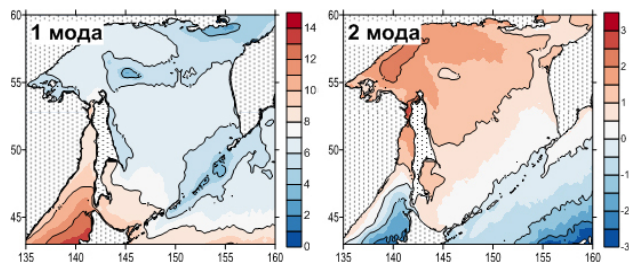


Рис. 3. Пространственное распределение значений (безразмерных) первой и второй моды ЕОФ ТПО (по спутниковым данным).

Пространственное распределение второй моды имеет узловую линию, вытянутую вдоль Курильских островов, положительные значения в северо-западной части Охотского моря и отрицательные в СЗТО. Положительный максимум временной функции в июле и отрицательные значения в октябре отвечают более раннему прогреву (и более раннему охлаждению) поверхностного слоя северо-западной части моря по сравнению юго-восточной и прилегающей к Курильским островам частью Тихого океана. Вместе с результатами гармонического анализа, это указывает на наличие сезонной «волны тепла», распространяющейся в изучаемом бассейне с северо-запада на юго-восток.

Пункт 3.2. Межгодовые вариации ТПО в изучаемом районе выражены главным образом в модуляции годового хода. Для их изучения анализировалась динамика максимумов (выбирались данные за самый теплый месяц – август). Вариации минимумов для температуры поверхности в Охотском море малы

и не так интересны. Полученная выборка в каждой пространственной ячейке была проанализирована на предмет наличия циклических составляющих. За зону влияния той или иной компоненты прием области, в которых амплитуда указанной компоненты превышает 1°C .

В большей части изучаемой акватории основную роль играют вариации с периодом около 6 лет (рис. 4). Зона ее влияния наиболее обширна и занимает южную половину Охотского моря и северную часть Японского моря, вплоть до Амурского лимана. Амплитуда этой гармонике в зоне ее влияния находится в пределах от 1 до 2°C . В окрестностях Курильских островов, у западного побережья о. Хоккайдо, у северо-восточного побережья о. Сахалин амплитуда несколько ниже (от 0.5 до 1°C). Далее на север, начиная с 52° с.ш., ее влияние падает и практически сходит на нет. В работе [Shevchenko et al., 2004] на основе ЕОФ-разложения температуры поверхности моря в северной части Тихого океана было показано, что колебание с близким периодом характерно для всей области, находящейся под влиянием течения Куроисио и его ветви – теплого Цусимского течения. Об этом свидетельствуют большие амплитуды в зоне указанных течений. Следовательно, в результате данного исследования удалось оценить границы влияния этой составляющей в Охотском море, которая проходит параллельно островам Курильской гряды и делит данный бассейн на две практически равные части. Вся северная часть Японского моря также характеризуется наличием этого цикла.

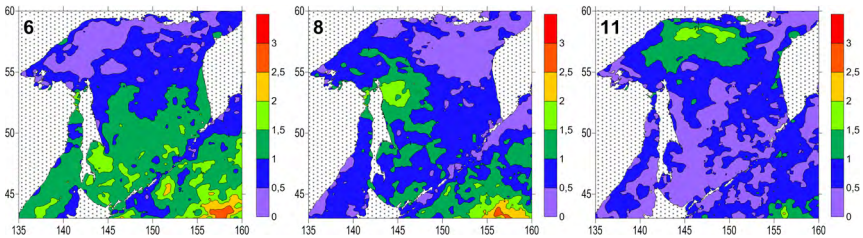


Рис. 4. Амплитуды основных циклических составляющих (в $^{\circ}\text{C}$) по спутниковым данным. Период в годах указан в левом верхнем углу изображения.

Наиболее высокие значения амплитуды 3-летней гармонике можно отметить в северо-западной части Охотского моря, на удалении от берегов, а также у северо-западного побережья Камчатки и в полосе от 47° до 49° с.ш. и от 147° до 149° в.д., в районе Курильской глубоководной котловины и в северо-западной части Тихого океана. Однако амплитуды этих колебаний несколько ниже, чем у шестилетней гармонике (от 1 до 1.5°C). На удалении от этих областей амплитуда постепенно снижается до нуля.

В западной части Охотского моря и СЗТО значимо проявляется циклическая компонента с периодом около 6 лет, главным образом, в зоне влияния стока реки Амур – Амурский лиман, южная и восточная части Сахалинского залива, область между полуостровом Шмидта и банкой Кашеварова [Ростов, Жабин, 1991]. Интересно, что в СЗТО данная составляющая имеет большие амплитуды, в зоне Цусимского течения в Японском море – незначительные, при этом на северном шельфе Хоккайдо и с охотоморской стороны Южных Курильских островов, где сказывается тепляющее влияние течения Соя, амплитуды существенно больше.

Наиболее низкочастотная из рассматриваемых гармоник с периодом 11 лет проявляется в северной части Охотского моря, на остальных участках изучаемого района ее роль незначительна. Довольно трудно выдвинуть разумную гипоте-

зу, которая могла бы объяснить столь значительные различия в весьма долгопериодных вариациях ТПО в различных частях одного бассейна. Ниже обсуждается возможная роль инсоляции в формировании этой циклической составляющей.

Пункт 3.3. Коэффициенты линейного тренда, рассчитанные по среднегодовым данным, в изучаемом регионе имеют в основном отрицательный знак, а на всей акватории Охотского моря КЛТ отрицательны. Значимое охлаждение поверхностного слоя (около 1.5°C за 10 лет) отмечено в северной и западной частях моря, наиболее ярко этот процесс проявляется в северной части моря, на некотором удалении от берега. Менее выраженное снижение (скорость около 0.5°C за 10 лет) наблюдается в районе Курильских островов и в полосе вдоль западного берега Камчатки (от 0.5 до 1°C за 10 лет), а также в зоне влияния стока реки Амур (Амурский лиман, Сахалинский залив, северная часть северо-восточного шельфа о. Сахалин). Значимое снижение (более 0.5°C за 10 лет) обнаружено в северной части Татарского пролива, далее на юг скорость охлаждения поверхностных вод уменьшается, а южнее 45° с.ш. зафиксировано слабое повышение температуры поверхностных вод Японского моря. Более высокие положительные КЛТ отмечены в северо-западной части Тихого океана, в юго-восточной части изучаемого региона.

Зимой в северо-западной части моря («охотоморском холодильнике»), а также на северном шельфе моря и северо-восточном шельфе о. Сахалин из-за ледяного покрова данных недостаточно для надежного расчета (рис. 5). Тем не менее, некоторое представление о тенденциях в термическом режиме в холодный период можно получить. На всей акватории Охотского моря, в особенности в северной и западной его частях, а также в Татарском проливе Японского моря и в СЗТО отмечена тенденция к снижению температуры поверхностного слоя вод. Противоположные знаки тренда зафиксированы только на юго-востоке изучаемого района, в Тихом океане, в северной части Японского моря и на самом юге Татарского пролива, к югу от 47° с.ш.

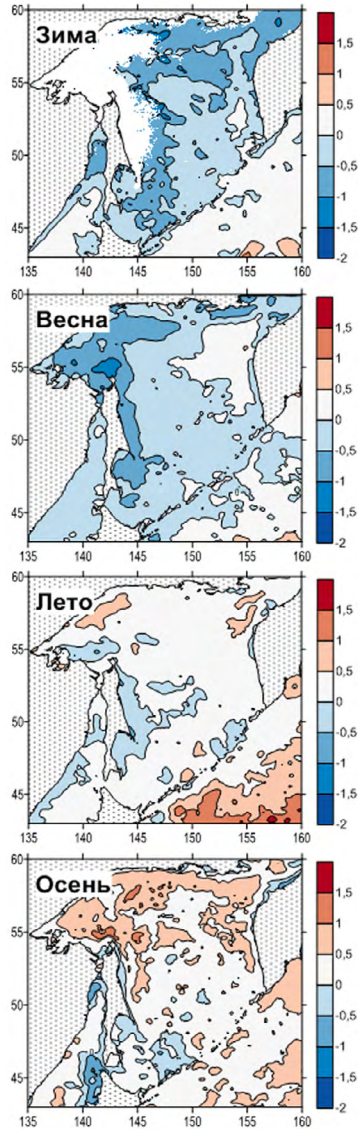


Рис. 5. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда (в $^{\circ}\text{C}$ за 10 лет) для различных сезонов (зима: январь-март; весна: апрель-июнь т.п.) по спутниковым данным.

Наиболее выражено снижение температуры поверхностного слоя вод в весенний период. Оно охватывает весь рассматриваемый регион, включая северо-западную часть Тихого океана, но наиболее выражено в северной и западной частях Охотского моря (скорости снижения от 1 до 1.5°C за 10 лет, на некоторых участках даже более высокие). Охлаждение поверхностного слоя весной является наиболее логичным следствием снижения ледовитости, так как при отсутствии ледяного покрова процессы выхолаживания охватывают слой вод большей толщины, чем при его наличии. Несомненно, это оказывает значительное влияние на климат региона, и прежде всего на погодные условия о. Сахалин, который испытывает воздействие данного процесса в наибольшей степени.

Летом и осенью в регионе преобладает тенденция к росту температуры поверхности моря. Летом наиболее выражена она в СЗТО. В Охотском море она отмечена в северо-западной его части и у северо-западного берега полуострова Камчатка и в районе островов Уруп и Симушир, на остальной части акватории тренды близки к нейтральным.

Осенью величина положительных трендов в СЗТО уменьшается, при этом в северной части Охотского моря растет. В Татарском проливе и у западного побережья о-ва Хоккайдо наблюдается тенденция к понижению температуры.

На основе параметров полученных циклических компонент и коэффициента линейного тренда, был выполнен ретроспективный прогноз термических условий на лето 2018 г. (данные наблюдений за 1998-2017 гг. использовались для расчета параметров гармоник и линейного тренда). Расчет производился для каждой пространственной ячейки по формуле (2) с учетом тренда и четырех гармонических составляющих с наибольшими амплитудами.

Кривые, являющиеся суммой тренда и первых четырех гармоник, в целом повторяют фактические межгодовые колебания температуры, коэффициент корреляции между исходным и расчетным рядами превышает в большинстве точек 90%. Отметим, что, даже первые две гармоники во многих случаях обеспечивают коэффициент корреляции более 0.7. Несмотря на то, что 2018 г. по термическим условиям был аномальным (ослаблено Цусимское течение и его охотоморская ветвь течение Соя, дефицит тепла ощущался в зоне влияния стока реки Амур, и в некоторых других районах, даже в таких акваториях прогноз можно считать приемлемым. Для северной части Охотского моря, северо-восточного шельфа о. Сахалин и ряда других районов наблюдалось хорошее согласие между расчетными и реальными значениями температуры поверхностного слоя.

Четвертая глава посвящена факторам, влияющим на ТПО. Из множества факторов, которые формируют термический режим поверхностного слоя воды, были выделены поток коротковолновой радиации (этот фактор непосредственно влияет на ТПО) и приземное атмосферное давление (как фактор, определяющий атмосферную циркуляцию).

Пункт 4.1. Были вычислены коэффициенты корреляции между рядами SWR и температуры поверхности моря из базы данных Сахалинского филиала ВНИРО (рис. 6). Наиболее высокие значения 0.3 – 0.6 (это статистически значимая связь с учетом длины сравниваемых серий по 276 значений) получены по периферии Охотского моря, в Японском море и Татарском проливе, а также у юго-восточного побережья Камчатки. На остальной части акватории коэффициент корреляции не является значимым. Понятно, что на формирование термических условий в поверхностном слое помимо солнечной радиации оказывает влияние много факторов – конвективные и адвективные движения

вод, льдообразование и т.д. Также логично, что влияние радиации в большей мере сказывается в сравнительно мелководных районах. В то же время такой сложный характер взаимосвязи между этими параметрами оказался неожиданным. Это побудило провести детальный анализ пространственно-временной изменчивости SWR по той же схеме, которая применялась при изучении вариаций ТПО в рассматриваемом районе.

В сезонной изменчивости потока коротковолновой радиации ярко прослеживается годовая гармоника с максимумом в июне-июле, а минимальным значением в декабре-январе. Это обстоятельство с учетом высокой корреляции с ТПО позволяет объяснить более ранний прогрев северо-западной части Охотского моря по сравнению с остальной его акваторией.

Амплитуда годовой гармоник увеличивается с юго-востока на северо-запад, а фаза меняется весьма незначительно. Вклад остальных сезонных гармоник невелик. В зимне-весенний период изоляции SWR отклоняются от зональных в областях, прилегающих к среднему положению ледяного покрова.

Зимой и весной над исследуемой акваторией доминируют положительные тренды SWR, зарождающиеся в феврале в южной, центральной и восточной части Охотского моря. Летом наблюдается противоположная картина – преобладают отрицательные тренды, причем наиболее сильно они выражены в июне, постепенно уменьшаясь к осени. В осенний период (с октября по декабрь) тренды практически отсутствуют.

В июле в северной части Охотского моря выделяются низкочастотные циклические компоненты с периодом около 11 лет. Это указывает на то, что именно инсоляция является причиной аналогичной цикличности в летних максимумах ТПО на северном шельфе моря. В области к северу от о-ва Хоккайдо пик приходится на 8-летнюю гармонику. В районе Шантарских о-вов преобладает гармоника с периодом 7 лет. В восточной части Охотского моря преобладают высокочастотные компоненты от 3 до 6 лет.

Пространственное распределение первой моды разложения последовательности полей SWR по ЕОФ, описывающей более 97% дисперсии изучаемого параметра, характеризуется уменьшением значений в направлении с юго-запада на северо-восток. Максимальные значения отмечены в центральной части Японского моря, минимальные – в центральной части Берингова и в районе Шантарских островов. В ее временной функции доминирует годовая гармоника с амплитудой 0.55 Вт/м^2 .

Пункт 4.2. На основе данных ERA5 по приземному атмосферному давлению рассчитаны средние многолетние показатели (нормы) за период с 1998 по 2020 гг. Также для каждого месяца построены карты пространственных распределений аномалий (отклонений фактического атмосферного давления от рассчитанной нормы). Наиболее значимые аномалии, как по величине, так и по масштабу, наблюдались в январе 2007 и 2009 гг. и в июле 2003 и 2004 гг. В январе 2009 г. это привело к понижению площади ледяного покрова в Охотском море. В июле 2003 г.

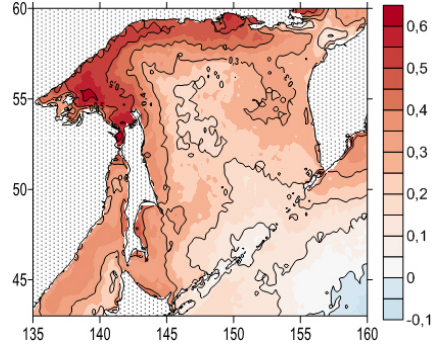


Рис. 6. Пространственное распределение коэффициентов корреляции между рядами данных по ТПО (СахНИРО) и коротковолновой солнечной радиации (ERA5).

более ранний прогрев северо-западной части Охотского моря по сравнению с остальной его акваторией.

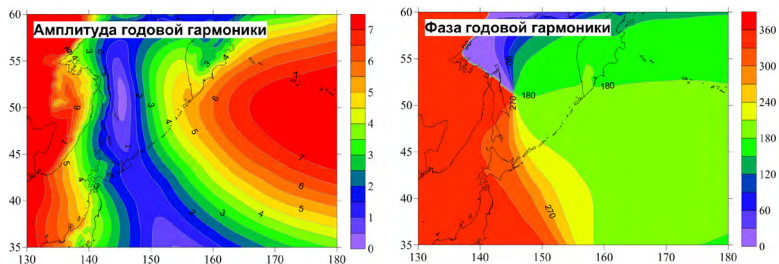


Рис. 7. Амплитуды (гПа) и фазы (в градусах) годовой и полугодовой гармоника ПАД.

вторжение арктического воздуха и его длительное пребывание над Охотским морем замедлило прогрев поверхностного слоя воды, а в июле 2004 г. вторжение тихоокеанского воздуха привело к значительным положительным аномалиям ТПО.

Помимо оценки аномалий проведен гармонический анализ сезонных вариаций ПАД. При анализе пространственного распределения амплитуды годовой гармоника выявлена узкая область с низкими значениями, разделяющая зоны с различным характером годовых вариаций над материком (максимум зимой, минимум летом) и Тихим океаном (противоположная динамика). Вблизи восточного побережья Сахалина имеется точка, в окрестности которой фаза этой составляющей изменяется на 360° - аналог амфидромии в теории приливов. При этом над материком фаза изменяется слабо, а вдоль границы раздела между областями с различным характером годового хода – очень резко. Амплитуда полугодовой гармоника невелика над материком и возрастает над океаном, максимальные значения (4-4.5 гПа) отмечены в области, ограниченной координатами $40-45^\circ$ с.ш. и $162-178^\circ$ в.д. (рис. 7). Фаза этой составляющей возрастает в направлении от материка в открытый океан. Амплитуды третьгодовой и четвертьгодовой циклических составляющих незначительны во всем изучаемом регионе.

В осенне-зимний период наблюдается тенденция к небольшому ослаблению Сибирского максимума (до 0.5 гПа за 10 лет) и более значительному ослаблению Алеутской депрессии (до 2.5 гПа за 10 лет). Это приводит к снижению градиента давления между зимними ЦДА и, как следствие, ослаблению потока арктического воздуха с севера (зимнего муссона), что может являться причиной уменьшения ледовитости Охотского моря. Разложение поля давления по ЕОФ подтвердило устойчивость поля ПАД и выявило некоторую нерегулярность возникновения положительных и отрицательных аномалий.

В **пятой главе** рассмотрено несколько вариантов применения накопленной информации в практических целях.

В **пункте 5.1** приведена оценка тенденций изменения температуры в нескольких биостатистических районах промысла минтая с февраля по май. Температурные условия в Охотском море в районах нереста минтая характеризовались как стабильные, с некоторой тенденцией к снижению в период нереста минтая (апрель – июнь) и активной фотосинтетической деятельностью [Ложкин и др., 2021]. Это указывает на устойчивые условия воспроизводства охотоморского минтая в отличие от япономорского.

В **пункте 5.2** описана еще одна важная задача – расчет средней даты наступления благоприятных условий для выпуска молоди лососей ($6-7^\circ\text{C}$) с лососевых рыбодоводных заводов (ЛРЗ) в различных районах. Подобные расчеты

могут быть полезны для тех видов рыб, моллюсков и др. живых организмов, которые сильно зависят от оптимальных условий.

Для двадцати двух прибрежных районов, прилегающих к устьям лососевых рек в южной части о. Сахалин, определены средние даты наступления комфортных условий для выпуска молоди лососей (+6-7°C), среднеквадратические и экстремальные отклонения от этих дат. Раньше всего (17-19 мая) происходит прогрев на юго-западном побережье Сахалина (в зоне влияния Цусимского течения в северной части Японского моря), затем в северо-западной части залива Анива (19-20 мая). Сравнительно быстрым прогревом характеризуется район устья р. Поронай (23 мая) из-за более существенного влияния речного стока, закрытости от северных ветров сгонного характера и преобладания ветров южного и юго-западного румбов [Като и др., 2001].

Среднеквадратическое отклонение даты прогрева достаточно велико и очень стабильно, для большинства станций оно составляет 8–10 суток. Наиболее раннее наступление условий, благоприятных для молоди лососевых рыб, отмечено в 2002 году на рубеже первой и второй декад мая. Экстремально поздние сроки их наступления наблюдались весной 2011 г. (22–27 июня). Значительные отрицательные аномалии температуры поверхности моря в конце мая – начале июня были обусловлены нетипичным полем приземного атмосферного давления, при котором не наблюдались характерные для этого периода времени ветра южных румбов. В результате, холодные воды и дрейфующие льды беспрепятственно выносились с северо-восточного шельфа Сахалина к его юго-восточному побережью.

Пункт 5.3. Выявлены значимые положительные аномалии ТПО в СЗТО в зоне нагула тихоокеанских лососей зимой 2019 г. и у восточного побережья Камчатки летом, что могло стать причиной слабых подходов горбуши. В ходе мониторинга нерестовых подходов горбуши к берегам Сахалина выявлено, что значимые аномалии ТПО в прибрежной зоне (как отрицательные, так и положительные) негативно сказываются на ее уловах.

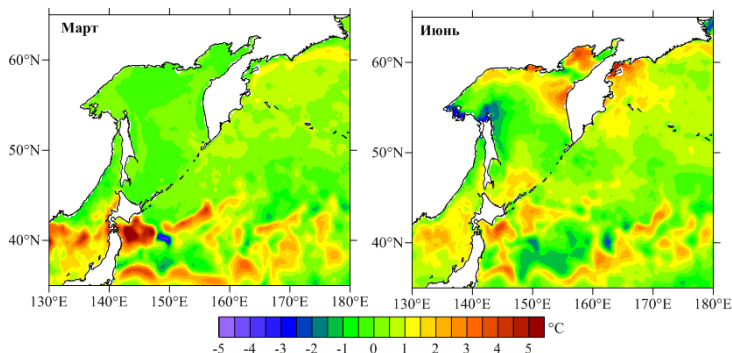


Рис. 8. Аномалии ТПО в мае-июне 2020 г. по данным ERA5.

Пространственное распределение аномалии температуры поверхности моря в марте представлено на рис. 8, в январе и феврале наблюдалась аналогичная картина. Значимые положительные аномалии обнаружены в южной части Японского моря и южной части СЗТО, а также в акватории у восточного берега Хоккайдо и северо-восточного побережья о. Хонсю. Менее существенные по-

ложительные отклонения от нормы наблюдались в западной части Берингова моря (за исключением Анадырского залива и акватории в районе м. Наварина) и центральной части СЗТО. Отрицательные аномалии получены в западной части Охотского и северо-западной Японского морей. Сложно однозначно относится к оценкам в последнем случае, так как существенная часть этих акваторий в зимние месяцы, и в марте в частности, покрыта льдом, следовательно, определенная часть данных была получена путем интерполяции, но в целом характер термических условий был именно таким.

Весной (в апреле-июне) 2020 г. значимость аномалий ТПО в южной части изучаемого района несколько снижается, а в северной, наоборот, возрастает. Прежде всего, это относится к акваториям, прилегающим к полуострову Камчатка как с восточной (Карагинский залив и акватории к югу и к востоку от него), так и с западной стороны, на участке между 52 и 58 параллелями. Значительный прогрев отмечен также в заливе Шелихова (за исключением Пенжинской губы) и в Тауйской губе, а также в целом на северном шельфе Охотского моря и в Курильской котловине. Смещение положительных отклонений температуры воды в поверхностном слое в северном направлении проявилось и в Японском море (вероятно, вследствие высокой активности теплого Цусимского течения), в частности, необычно теплые условия отмечены у юго-западного берега о. Сахалин в мае-июне 2020 г.

Пространственное распределение первой моды разложения ТПО по ЕОФ носит выраженный зональный характер (значения убывают в северном направлении). Четко выделяется субполярный фронт в районе 40 параллели, зоны апвеллинга (банка Кашеварова, Ямские острова, Средние Курилы, СВ шельф Сахалина), область влияния теплого Цусимского течения и другие известные особенности ТПО. Ее амплитуда имеет характер циклических сезонных вариаций, межгоддовая изменчивость выражена в слабой модуляции годового хода, не имеющей закономерного характера. На фоне этих устойчивых колебаний выделялись более высокие значения временной функции в январе–апреле 2020 г. Расчеты по выборкам для этих месяцев показали, что разница между величиной временной функции для 2020 г. в сравнении со средним значением за 1998–2019 гг. составила от 1.9 до 2.6 величины среднеквадратического отклонения.

Пространственное распределение второй моды имеет узловую линию вблизи субполярного фронта. В северной части изучаемого района наклон изолиний параллелен береговым линиям, максимальные положительные значения моды в северо-западной части Охотского и северной Японского морей. Амплитуда второй моды также носит выраженный характер годовых колебаний с максимальными значениями в августе и минимальными в марте, однако, в отличие от первой, она меняет свой знак (положительные значения, как правило, с июня по октябрь, в остальные месяцы отрицательные). Это, в частности, означает, что в западной части Охотского моря и северо-западной Японского эта мода дает существенный положительный вклад летом и отрицательный зимой, в области южнее 40 параллели ситуация противоположна. Так же, как и в первой моде, оценка огибающей амплитуды, как по летним, так и по зимним месяцам, каких-то интересных закономерностей не выявила. В зимние месяцы 2020 г. не отмечено существенных отклонений амплитуды этой моды от обычных значений.

Пункт 5.4. Изучено влияние температурных условий на развитие устриц. Показано, что в аномально теплые годы средние показатели высоты и массы устрицы значительно ниже нормы, а в холодные годы – выше нормы.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Выполнено количественное сравнение ТПО по данным спутниковых наблюдений (база СахНИРО) и реанализа ERA5 для стандартного района. Показано, что зимой и летом ТПО по данным реанализа выше спутниковой ТПО. Осенью и особенно весной картина противоположная, в среднем по году расхождения невелики, за исключением некоторых динамически активных районов – Шантарских островов, зоны влияния стока реки Амур, областей апвеллинга. Вероятно, сложность моделирования гидрологических процессов в таких акваториях может приводить к определенным неточностям данных ERA5.

2. Анализ сезонных вариаций ТПО показал, что амплитуда годовой гармоника убывает с востока на запад, минимальные значения отмечены в зонах квазистационарных апвеллингов в районе Средних Курил, Ямских островов, на банке Кашеварова и т.д. Ее фаза возрастает в направлении с северо-запада на юго-восток, что указывает на более ранний прогрев на северо-западном шельфе и более поздний в СЗТО (сдвиг около месяца).

3. Выявлено снижение среднегодовых значений ТПО в стандартном районе. Наиболее значимы отрицательные тренды (скорость снижения $0.5\text{--}1.5^\circ\text{C}$ за 10 лет) в северной и западной частях изучаемого бассейна. Отрицательные тренды температуры особенно велики весной в замерзающих акваториях, что позволяет связать наблюдаемую тенденцию с уменьшением ледовитости и увеличением глубины зимней конвекции в районах, традиционно покрытых льдом в зимний период. В августе-октябре в регионе преобладает тенденция к росту ТПО, наиболее выражена она в северо-западной части Тихого океана. В Охотском море она отмечена в северо-западной его части.

4. Пространственное распределение первой моды разложения полей ТПО по ЕОФ выявило более высокие значения в северной части Японского моря, СЗТО и юго-западной части Охотского моря по сравнению с основной его акваторией. Наиболее низкими значениями характеризуются зоны квазистационарных апвеллингов. Временная функция первой моды имеет выраженный годовой ход с амплитудой годовой гармоника 0.9°C . Пространственное распределение второй моды имеет узловую линию, вытянутую вдоль Курильских островов, положительные значения в северо-западной части Охотского моря и отрицательные в СЗТО. Положительный максимум временной функции в июле и отрицательные значения в октябре отвечают более раннему прогреву (и более раннему охлаждению) поверхностного слоя северо-западной части моря по сравнению с Тихим океаном.

5. Определены основные циклические компоненты ТПО в августе, отвечающие за межгодовые вариации ТПО, и их «зоны влияния». Показано, что главный вклад в эти вариации дают составляющие с периодом около 6 лет, а также 3, 8 и 11 лет. Зона влияния основной 6-летней гармоника наиболее обширна и занимает южную половину Охотского моря и всю северную часть Японского моря, ее амплитуда находится в пределах $1\text{--}2^\circ\text{C}$. Показана возможность прогнозирования ТПО на год вперед с использованием «метода последовательных спектров».

6. В сезонной изменчивости SWR выделяется годовая гармоника с максимумом в июне-июле и минимальным значением в декабре-январе. Амплитуда этой составляющей увеличивается с юго-востока на северо-запад, а фаза меняется в пределах 30° , что соответствует сдвигу приблизительно на месяц. Вклад остальных сезонных гармоник невелик. Наиболее вероятно, именно инсоляция

является причиной более быстрого прогрева в июне-июле в северо-западной части Охотского моря.

7. По выборке данных SWR за июль, при оценке огибающей параметра по максимальным значениям, выделяются циклические компоненты с периодами 3, 5, 7 и 11 лет. Только самая низкочастотная из них имеет значимый отклик в вариациях температуры поверхности моря на северном шельфе Охотского моря, составляющие с периодами 3, 5 и 7 лет аналогичных вариаций ТПО не вызывают.

8. Пространственное распределение первой моды разложения полей SWR по ЕОФ, описывающей около 97% дисперсии изучаемого параметра, характеризует общие закономерности потока солнечной радиации. В ее временной функции доминирует годовая гармоника с амплитудой 0.55 Вт/м^2 и максимумом в мае-июне. Вторая мода является региональной поправкой, она компенсирует относительно малый вклад первой моды в сезонные вариации SWR в северо-западной части Охотского моря, что согласуется с высокими значениями амплитуды годовой гармоники и их уменьшением в южной части изучаемого района.

9. При анализе пространственного распределения амплитуды годовой гармоники ПАД выявлена узкая область с низкими значениями, разделяющая зоны с различным характером годовых вариаций над материком (максимум зимой, минимум летом) и Тихим океаном (противоположная динамика). Вблизи восточного побережья Сахалина имеется точка, в окрестности которой фаза этой составляющей изменяется на 360° - аналог амфидромии в теории приливов. При этом над материком фаза изменяется слабо, а вдоль границы раздела между областями с различным характером годового хода – очень резко.

10. В результате анализа поля ПАД выявлено, что в осенне-зимний период наблюдается тенденция к небольшому ослаблению Сибирского максимума (до 0.5 гПа за 10 лет) и более значительному – Алеутской депрессии (до 2.5 гПа за 10 лет). Это приводит к снижению градиента давления между зимними ЦДА и, как следствие, ослаблению зимнего муссона, что может являться дополнительным фактором (помимо повышения температуры воздуха в Арктике) уменьшения ледовитости Охотского моря и согласуется с результатами, полученными на основе более ранних наблюдений (Глебова и др., 2009).

11. Разложение поля ПАД по ЕОФ подтвердило устойчивость поля ПАД, значимые отклонения от средних многолетних распределений возникают редко. Аномальное состояние поля ПАД обычно приводит к нехарактерному распределению ледяного покрова или температуры поверхности Охотского моря (в зависимости от отклонений циркуляции атмосферного воздуха от обычного режима). Ослабление зимнего муссона может привести к более теплым условиям и задержке льдообразования (2009 г.), летом же вторжение арктического воздуха замедляет прогрев поверхностного слоя воды (2003 г.). Ослабление летнего муссона приводит также к значительным положительным аномалиям ТПО в южной части изучаемого района и отрицательным на северо-западе Охотского моря (2004 г.) или позднему выносу льда к юго-восточному побережью о. Сахалин (2011 г.).

12. Изучено негативное влияние отклонений термических условий от нормы на некоторые виды водных биологических ресурсов, в том числе на тихоокеанских лососей. Показано, что при отрицательных аномалиях ТПО в прибрежье уловы горбуши резко падают, а при положительных возрастает ее пораженность паразитами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в список ВАК

1. **Ложкин Д. М.**, Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В. Спутниковый мониторинг температурных условий в районах устьев нерестовых рек южной части о. Сахалин. // Исследование Земли из космоса. – 2018. – № 5. – С. 15-22. = Lozhkin D. M., Tskhay Zh. R., Shevchenko G. V. Satellite Monitoring of Temperature Conditions near the Mouths of Spawning Rivers in the Southern Part of Sakhalin Island // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2019 – Vol. 55. – No 9. – P. 1166-1171. – DOI 10.1134/S0001433819090263.
2. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным 1998–2017 гг. // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 1. – С. 55–61. = Lozhkin D. M., Shevchenko G. V. Trends in the Sea Surface Temperature in the Sea of Okhotsk and Adjacent Basins Based on the Satellite Data in 1998–2017 // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2019. – Vol. 55. – No 9. – P. 1133-1137. – DOI 10.1134/S0001433819090251.
3. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Циклические вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным в 1998–2018 гг. // Исследование Земли из космоса. – 2020. – № 1. – С. 44–51. = Lozhkin D. M., Shevchenko G. V. Cyclical Variations in the Surface Temperature in the Sea of Okhotsk and Adjacent Waters, According to 1998–2018 Satellite Data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. – 2020. – Vol. 56. – No 12. – P. 1621-1627. – DOI 10.1134/S0001433820120464.
4. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Сезонная изменчивость приземного атмосферного давления на Дальнем Востоке России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 249-260. – DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-4-249-260.
5. **Ложкин Д. М.**, Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В. Особенности температурных условий и распределения концентрации хлорофилла *a* в Охотском море в период нереста минтая по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 230-240. – DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-2-230-240.
6. Ким А. Ч., **Ложкин Д. М.** Влияние суммарного значения температуры воды на размерно-массовые характеристики тихоокеанской устрицы *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793) в заливе Анива (о. Сахалин) по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 2021. – № 5. – С. 85-93. – DOI 10.31857/S0205961421050067.
7. Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В., **Ложкин Д. М.** Анализ термических условий в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 2022. – № 1. – С. 30-37. DOI: 10.31857/S0205961422010079

Публикации в других изданиях

1. **Ложкин Д. М.** Температурные условия в районах устьев рек Сахалина и о. Итуруп для определения срока выпуска молоди с лососёвых рыбопроизводных заводов // XVII Международная конференция по науке и технологиям. Россия-Корея-СНГ. - 2017. - С. 46–51.
2. **Ложкин Д. М.**, Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В. Температурные условия в районах устьев нерестовых рек южной части о. Сахалин по спутниковым данным. // XVI Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. – 2018. – С. 290.
3. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Основные тенденции изменения температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным в 1998–2017 гг. // XVI Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. – 2018. – С. 291.
4. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Анализ периодических колебаний температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным в 1998–

- 2018 г. // XVII Всероссийская открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. – 2019. – С. 295.
5. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Линейные тренды и циклические вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным // VII научно-практическая конференция молодых учёных с международным участием «Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса». – 2019. – С. 257-262.
 6. Ким А. Ч., **Ложкин Д. М.** Промысел и биологическое состояние Тихоокеанской устрицы *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793) в заливе Анива (остров Сахалин) // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование: Материалы XII Национальной (всероссийской) научно-практической конференции. В 2-х частях, Петропавловск-Камчатский, 28–29 апреля 2021 года. – Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2021. – С. 105-109.
 7. Шевченко Г. В., Цхай Ж. Р., **Ложкин Д. М.** Спутниковый мониторинг термических условий у побережья о. Сахалин в период ската и нереста тихоокеанских лососей // Искусственное воспроизводство тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке России: Научная конференция (г. Южно-Сахалинск, 29-30 мая 2018 г.). - 2018. - С. 40.
 8. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Тренды температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по результатам спутникового мониторинга в 1998-2017 гг. // Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. - 2019. - С. 97.
 9. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Циклические вариации температуры поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по данным спутниковых наблюдений в 1998-2018 гг. // Геодинамические процессы и природные катастрофы: тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием. - 2019. - С. 98.
 10. **Lozhkin D.M.** and Shevchenko G.V. SST lowering in the Sea of Okhotsk as the result of global warming // PICES-2020 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract. Victoria, BC, Canada, 2021. P. 27
 11. Tskhay Zh.R., Shevchenko G.V. and **Lozhkin D.M.** Analysis of thermal conditions in the northwest Pacific Ocean from satellite data // PICES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract. Victoria, BC, Canada, 2021. P. 89.
 12. **Lozhkin D.M.** and Shevchenko G.V. Seasonal and interannual variability of shortwave radiation in the northwest Pacific Ocean from satellite data // PICES-2021 Virtual Annual Meeting. Book of Abstract. Victoria, BC, Canada, 2021. P. 89.
 13. **Ложкин Д. М.**, Шевченко Г. В. Сезонная и межгодовая изменчивость поля солнечной радиации с учетом облачности над Охотским морем и прилегающими акваториями // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса : Сборник трудов IX Научно-практической конференции молодых учёных с международным участием, посвященная 140-летию ВНИРО, Москва, 11–12 ноября 2021 года / Москва: ВНИРО, 2021. – С. 108-110.

Глава в монографии:

Lozhkin D. M. Analysis of Spatiotemporal Variability of Surface Temperature of Okhotsk Sea and Adjacent Waters Using Satellite Data // Satellite Systems - Design, Modeling, Simulation and Analysis, Tien Nguyen, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.94918. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/74274>

ЛОЖКИН Дмитрий Михайлович

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ
И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЙ ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАНАЛИЗА ERA5**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

План 2022 г. Подписано в печать 1.04.2022
Уч.-изд. л. 1,1. Усл. печ. л. 1,18. Зак. 7984. Тираж 100 экз.

Отпечатано в
Участок офсетной и оперативной полиграфии
ИМГиГ ДВО РАН
693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 1Б