



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 1 (55). Март, 2025

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugotek
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



УДК 551.526.6; 551.588.2

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

РАКИТИН
Тихон Дмитриевич

Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, д. 7-9, gatwar47@mail.ru

Ключевые слова:

Японское море
береговая зона
ландшафтно-биономическое районирование
морфоструктуры
космический мониторинг
сезоны
многолетняя изменчивость
температура

Аннотация: Исследована изменчивость температурного режима поверхностных вод в береговой зоне и на шельфе в северо-западной части Японского моря. Градиент температуры ограничивается морфоструктурными районами, где главной фундаментальной единицей считается морской ландшафт. В береговой зоне в исследуемой части моря наблюдения за изменчивостью температуры в поверхностном слое проводились и продолжают вести сотрудниками ТОИ им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Тихоокеанского филиала ВНИРО, ИВЭП ДВО РАН и др., но сбор данных осуществляется нерегулярно и *in situ*, исследователи не учитывают ландшафтный фактор. Актуальность данной статьи заключается в комплексном подходе при помощи метода ландшафтно-экологического районирования и данных космического мониторинга. Типизация берегов в северо-западной части Японского моря позволяет отмечать районы с разной температурой поверхности воды, а дистанционное зондирование океана со спутника помогает определять их пространственно-временное распределение с 2003 по 2022 г. На сегодняшний день нельзя с уверенностью сказать, что есть подобный и подробный алгоритм обработки спутниковых данных с использованием программных обеспечений Surfer, SeaDAS и ArcGIS. В дальнейшем полученные данные будут использоваться для изучения влияния температуры на динамику продуктивности фитопланктона. Обработанные данные позволят показать вероятность изменчивости климата региона и динамику биологической продуктивности в морской экосистеме в пределах береговой зоны моря.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 12 февраля 2025 года

Подписана к печати: 02 апреля 2025 года

Введение

В Японском море наблюдается сезонное движение водных масс. С севера Татарского пролива поступают холодные воды с Западно-Приморским течением вдоль материка и острова Сахалин. Тёплые воды приходят с Цусимским течением, которое проходит вдоль островов Хонсю и Хоккайдо и через пролив Лаперуза из Жёлтого моря. Температура водных масс определяет климатическое состояние вод и сезонное цветение фитопланкто-

на, от которого зависит биопродуктивность приморской экосистемы (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 2003).

Ландшафтно-экологическое (биономическое) районирование береговой зоны и шельфа, методология которого предложена К. М. Петровым (1989), характеризует природные факторы морской среды, включая пространственное распределение температур и биоценозов в береговой зоне моря. Метод автора теоретизирован в следующих

работах, посвященных изучению подводных ландшафтов (Петров, 2004, 2020) и Японского моря (Петров, Поздеев, 1992; Петров, 2004, 2020). Принципы теории районирования основаны на трех системных единицах: вертикальной, зональной и азональной поясности.

Вертикальная поясность. У морского берега с глубиной изменяется характер рельефа и грунта материковой отмели, инсоляция и качественный состав биоценозов, поэтому шельф принято разделять на три пояса: верхний (внутренний шельф), средний и нижний (внешний шельф). За объект исследований взят внутренний шельф – береговая зона (БЗ) моря. Согласно К. М. Петрову (2020, 2023) и Э. Дж. Соутворду (Soutward, 1965), *внутренний шельф*, или БЗ, подразделяется на супралитораль (зону заплеска), литораль (верхнюю, среднюю, нижнюю) – приливно-отливную зону и сублитораль, последняя делится на этажи и ступени. Литораль и сублитораль подвержены сезонной изменчивости температур и солнечной радиации, перемешиванию водных масс и ледовитости, которые ускоряют или замедляют динамику биоценозов, особенно развитие фитопланктона и макрофитов.

Зональная поясность. В зональном аспекте северо-западную часть Японского моря охватывают две природные зоны – бореальная и неморальная (Зенкевич, 1962). Северная часть моря, включая дельту реки Амур, северный Сахалин и южное Приморье, а также перешеек Поясок на Сахалине, попадает в бореальную зону с температурным диапазоном от 0 до 5 градусов в феврале и от 15 до 20 градусов в августе. В качестве индикаторов, указывающих на принадлежность к этой зоне, выступают холодолюбивые диатомовые водоросли *Deatomea* и фукусовые водоросли *Fucus*.

В южной части моря (акватория южной части Перешейка Поясок и Южного Сахалина) проходит неморальная зона, где февральские температуры 5–10 °С, а августовские 20–25 °С. Биоиндикаторы представлены теплолюбивыми динофитовыми – *Dinophyta* и ассоциациями – *Sargassum pallidum*, *S. miyabei* и *Corallina pilulifera* (Петров и др., 2004; Петров, 2020).

Азональная поясность. Крупные береговые морфоструктуры – материковая Сихотэ-Алинская горная цепь и островные Западно-Сахалинские горы – формируют рельеф берегов, но ведущая роль принадлежит дифференцированным новейшим и совре-

менным тектоническим движениям. Внутренняя геодинамика выстраивает форму морского бассейна от побережья до бровки шельфа, переходящего к береговому склону и подножью (Ху, 2001; Sanzhong et al., 2022). К. М. Петров (2020, 2022) также отмечает, что морские ландшафты принято типизировать на поперечные и продольные.

Орбитальные метеорологические спутники глобально и круглосуточно регистрируют данные по температуре поверхности воды (ТПВ_{спут}) и продуктивности фитопланктона. Они детектируются на многоканальные спектрорадиометры, установленные на спутниках: Aqua/Terra (NASA), Sentinel 3A/3B (ESA), SuomiNPP (NOAA), NOAA-20 (NOAA/NASA) и т. п. (Ракитин, 2022). В данной статье используются значения с полярно-орбитального спутника MODIS-Aqua, изображения и показатели которого можно получить на официальном сайте космического агентства National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2024).

Следует отметить, что ТПВ_{спут} может отличаться от судовых наблюдений за температурой из-за присутствия в верхних слоях воды взвесей (Суетин и др., 2002), которые повышают погрешность в спектральном диапазоне 429–710 нм (Viktor, 2011). В рамках статьи для улучшения качества дешифрирования космических снимков (КС) используется авторский алгоритм из адаптируемых программ (SeaDAS, ArcGIS), описательного и статистического анализа многолетних (2003–2022 гг.) рядов ТПВ_{спут} за каждый сезон. Они показывают многолетнюю динамику температуры в исследуемой части моря и сезон, в который она более существенна. Практическая ценность исследования заключается в том, что оно позволяет оценить долгосрочные перспективы изменения климата в регионе. В дальнейшем эти данные могут быть использованы для выявления зависимости продуктивности фитопланктона от температурных колебаний.

Цель работы – проанализировать многолетнюю и сезонную изменчивость температуры поверхности воды в ландшафтно-бионических районах береговой зоны в северо-западной части Японского моря.

Материалы

Объектом исследования является береговая зона в северо-западной части Японского моря. В БЗ построены и выделены ландшафтно-бионические районы (рис. 1), для которых отбирались спутниковые данные ТПВ.

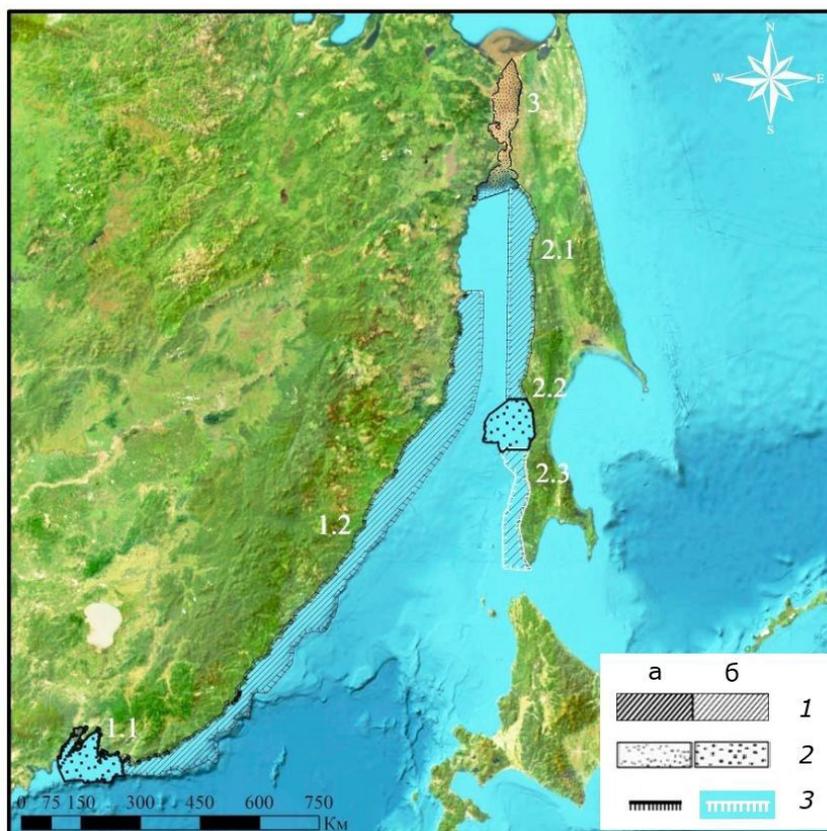


Рис. 1. Границы областей и районов в северо-западной части Японского моря. Масштаб 1:2500000. Подготовлено автором в ArcGISPro. Условные обозначения: I. Сихотэ-Алинская область, районы: 1.1. Южно-приморский, 1.2. Центральнo-приморский; II. Островная Сахалинская область, районы: 2.1. Северный, 2.2. Перешеек Поясок, 2.3. Южный; III. Область северной части Татарского пролива. Обозначения: 1 – участки интенсивного (а) и замедленного (б) поднятия земной коры, 2 – участки опускания земной коры (а - аккумулятивные берега с широким песчаным пляжем, б - подводно-береговой склон аккумулятивного типа), 3 – абразионные участки с активным клифом (а, черный цвет), с мертвым клифом (б, белый цвет)

Fig. 1. The boundaries of regions and districts in the northwestern part of the Sea of Japan. Chart scale 1:12500000. Prepared by the author in ArcGISPro. Symbols: I. Sikhote-Alin region, districts: 1.1. Southern-Primorskiy, 1.2. Central-Primorskiy; II. Sakhalin Island region, districts: 2.1. Northern, 2.2. Isthmus Belt, 2.3. Southern; III. The area of the northern part of the Tatar Strait. Designations: 1 – areas of intensive (a) and slow (b) crustal uplift, 2 – areas of crustal subsidence (a - accumulative shores with a wide sandy beach, b - underwater coastal slope accumulative type), 3 - abrasive areas with active cliff (a, black), with death cliff (b, white color)

На рис. 1 районы типизируются в зависимости от морской глубины и ширины шельфа. К. М. Петров отмечает, что морские берега делятся на два типа – поперечные и продольные. У поперечных приморских берегов оси складок направлены перпендикулярно береговой линии. К примеру, в Южно-Приморском районе Сихотэ-Алинской области складка склона хребта поперечного типа. Для такого типа берега характерны: система мысов, островов, высокие берега, замедленная тектоническая депрессия, чередование абразионно-ингрессионных и абразионно-бухтовых берегов с аккумулятивными пляжами, четвертичные отложения на дне

залива Петра Великого (Медведев, 1961), шельф широкий до 100 км (рис. 2).

У продольных берегов оси складок идут по направлению берега. Возьмем в качестве примера Южный район Сахалинской области с выходящей складкой Западно-Сахалинского хребта. Такому типу свойственны: высокие продольные берега с преимущественно активным клифом на севере, однако на юге он мертвый без процессов абразии, подводно-береговой склон приглубый до 40–60 м, замедленное тектоническое поднятие, берег окаймлен поясом скал, шельф узкий до 10 км (рис. 3).

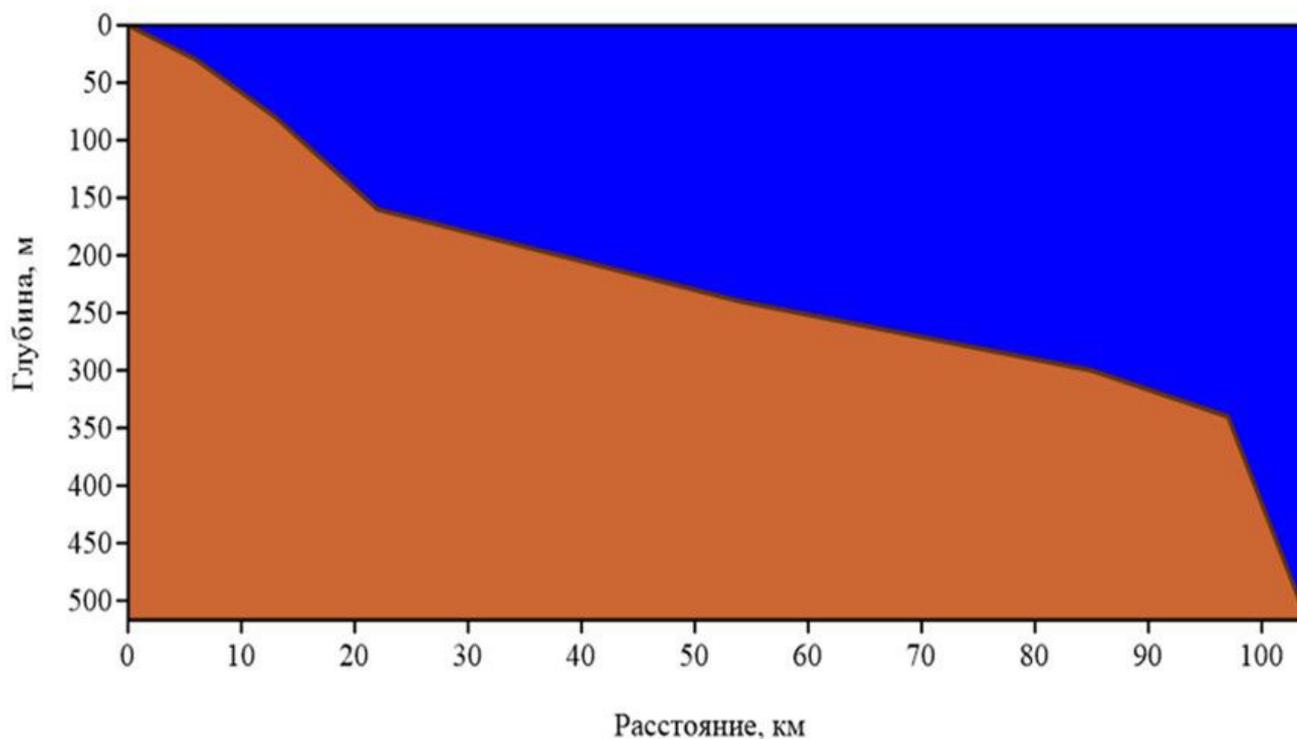


Рис. 2. Батиметрический профиль залива Петра Великого в южном Приморье. Составлено автором в Surfer по данным морской навигационной карты 1966 г.

Fig. 2. Bathymetric profile of Peter the Great Bay in southern Primorje. Compiled by the author in Surfer with based on the data of the 1966 marine navigation map

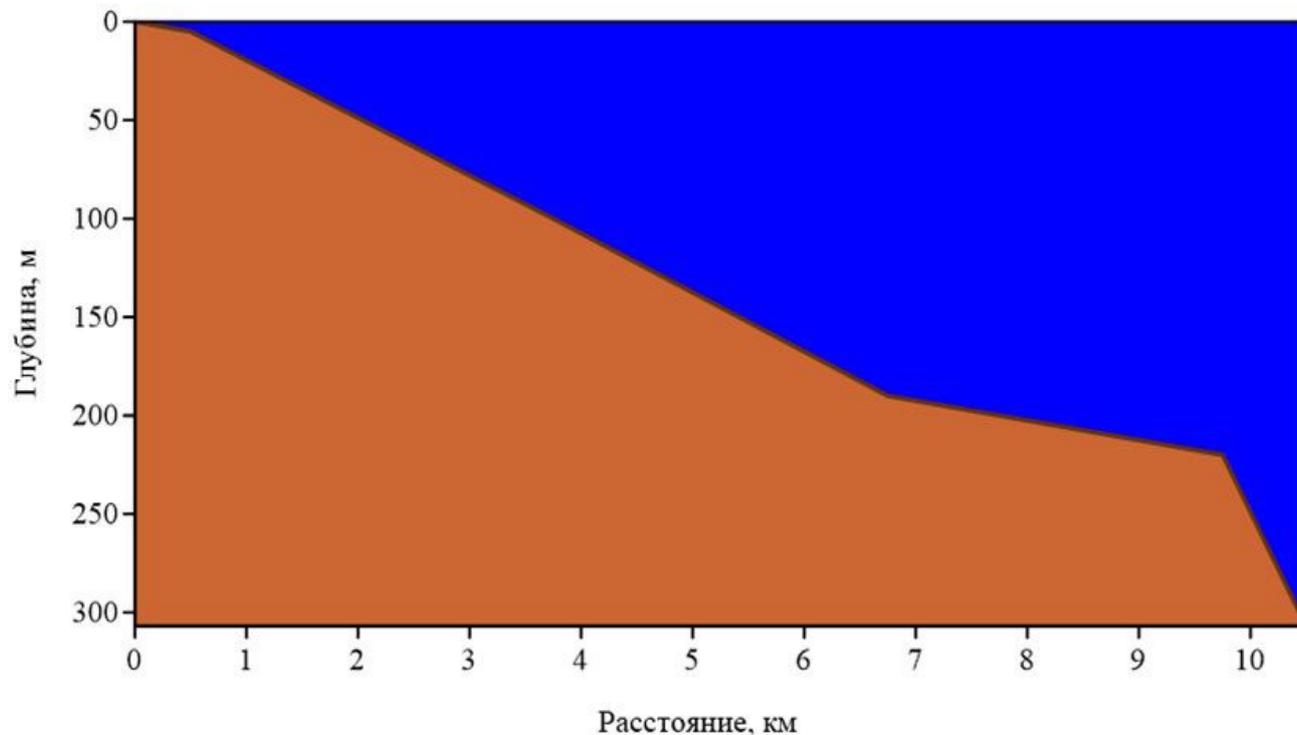


Рис. 3. Батиметрический профиль шельфа на юге Западно-Сахалинских гор. Составлено автором в Surfer по данным морской навигационной карты 1969 г.

Fig. 3. Bathymetric profile of the shelf in the south of the West Sakhalin Mountains. Compiled by the author in Surfer based on the data of the 1969 marine navigation map

Спутниковые радиометрические снимки ТПВ_{спут} (°С) со сканера MODIS демонстрируют не только температуру, но и океаноло-

гические условия на море за каждый сезон (рис. 4).

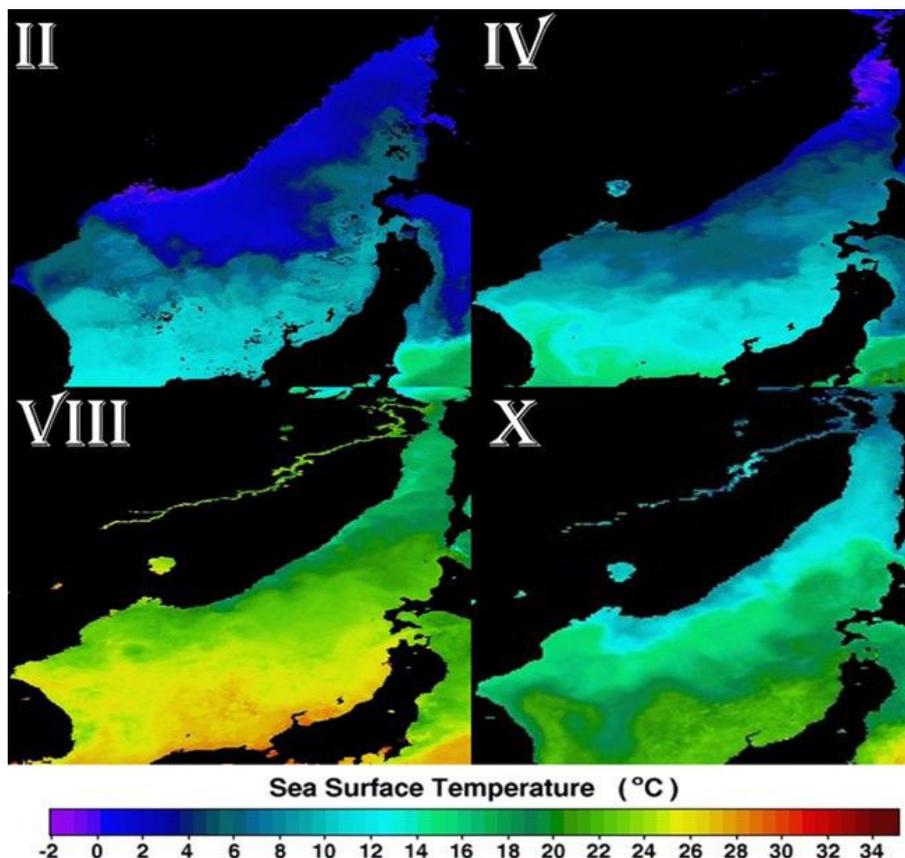


Рис. 4. Космические изображения температуры поверхности Японского моря. Данные, полученные датчиком MODIS с полярно-орбитального спутника «Aqua», 2022 г. (NASA, 2024). Сезоны: II – зима (февраль), IV – весна (апрель), VIII – лето (август), X – осень (октябрь)

Fig. 4. Satellite images of the surface temperature of the Sea of Japan. Data received by the MODIS sensor from the polar-orbiting satellite "Aqua", 2022 (NASA, 2024). Seasons: II – winter (February), IV – spring (April), VIII – summer (August), X – Autumn (October)

Анализируя изображения, можно увидеть, что в береговой зоне на северо-западе моря поверхностные воды зимой показывают температуру в среднем 1.5 °С (синий цвет и его оттенки, 0–2 °С), в это же время залив Петра Великого и север Татарского пролива практически полностью покрыты сплошным льдом (черный цвет). Этим же цветом обозначается дрейфующий лед, отображенный в мелких или зернистых точках. Весной ТПВ_{спут} становится в среднем 4.0 °С (синие и темно-зеленые тона, 2.0 °С и 4.0–6.0 °С), и припайный лед остается только в северной части пролива. Летом палитра цвета меняется в сторону теплых тонов (16.0–20.0 °С), и в береговой зоне средняя ТПВ_{спут} равна 16.5 °С. Осенью в светло-голубых тонах (10.0–14.0 °С) температура показывает средние значения 12.5 °С.

Методы

Ландшафтно-биоэкономическое районирование

северо-западной части Японского моря базируется на морфоструктурной основе с кратким указанием комплекса экологических условий. Для этого на цифровой карте в ArcGIS были обозначены области и районы в БЗ (см. рис. 1). Для определения батиметрического профиля шельфа были отобраны две морские навигационные карты масштаба 1:500000 1966 и 1969 гг., оцифрованные в Surfer.

Космический мониторинг проведен с полярно-орбитального спутника MODIS-Aqua. Спутниковые изображения в количестве 480 файлов получены в форматах jpg, NetCDF по заданным стандартным параметрам (уровень обработки L3, временное осреднение по месяцам, пространственное разрешение 4 км) за 20 лет (2003–2022 гг.). КС обработаны в SeaDAS, далее рассчитывались и анализировались данные по статистическим коэффициентам в Excel и были построены многолетние сезонные (2003–2022 гг.) ряды ТПВ_{спут}

с указанием среднего квадратичного отклонения (СКО, σ). Статистическая значимость трендов оценивалась с помощью уровня значимости p -value: если p -value ≥ 0.10 (статистическая вероятность меньше 90 %), то тренд незначимый, и наоборот, если p -value ≤ 0.10 (статистическая вероятность больше 90 %), то тренд значимый. Гидрометеорологическая характеристика северо-западной части Японского моря дается по: Моря и океаны. Волнение (2024) и Гидрометеорология и гидрохимия морей. Японское море... (2003, 2004).

Результаты

Южно-приморский район. В БЗ возникают суточные приливы до 0.5 м. В теплый период года прогрев и освещенность зоны повышают активность развития сообществ фитопланктона и макрофитов. С конца ноября залив Петра Великого покрыт сплошным льдом, а его стаивание происходит в начале апреля. Район относится к холоднобореальной зоне, где существенную роль в динамике температуры оказывают холодное Западно-Приморское и западная ветвь теплого Цусимского течения. Биоиндикаторами зоны служат диатомовые – *Deatomea* и фукусовые – *Fucus* водоросли. Многолетняя и сезонная изменчивость ТПВ_{сут} представлена на рис. 5.

В Южно-приморском районе получен положительный статистически значимый тренд (p -value = 0.000). Зимняя ТПВ_{сут} (ср. знач. = 1.25 °C; σ = 0.31 °C) была наименьшей (0.83 °C) в 2003, 2006 и 2008 гг., а в дальнейшем показала рост до 2.00 °C в 2022 г. Весной тренд статистически не значим (p -value = 0.102). ТПВ_{сут} (ср. знач. = 4.75 °C; σ = 0.28 °C) снижается до 4.33 °C в 2010 г., а после увеличивается до 5.50 °C в 2022 г. Летом не обнаружена статистическая значимость тренда (p -value = 0.823), а ТПВ_{сут} (ср. знач. = 18.01 °C; σ = 0.40 °C) показывает ее медленное увеличение. Осенний статистический тренд незначим так же, как и летом (p -value = 0.137), а ТПВ_{сут} (ср. знач. = 13.11 °C; σ = 0.43 °C) незначительно растет.

Центрально-приморский район. В БЗ действуют суточные приливы до 0.7 м. Гидрометеорологические условия, зональность и виды биоиндикаторов практически однотипны Южно-приморскому району, а температура указана на рис. 6.

В Центрально-приморском районе установлено, что зимний положительный статисти-

ческий тренд незначим (p -value = 0.772), а ТПВ_{сут} (ср. знач. = 1.56 °C; σ = 0.20 °C) понижается до 1.17 °C в 2008 г. и продолжает непрерывный рост, достигая 2.00 °C в 2013 г. Весенний тренд статистически не значим (p -value = 0.270), но ТПВ_{сут} (ср. знач. = 4.39 °C; σ = 0.27 °C) снижается до 3.83 °C в 2006 г., а затем продолжает свой рост. Летний тренд показывает положительную статистическую значимость (p -value = 0.061). По ТПВ_{сут} (ср. знач. = 18.90 °C; σ = 0.52 °C) видно, что она убывает до 18.00 °C в 2004 г., и линия графика возрастает до 20.50 °C в 2016 г. Осенний тренд вывел сезонную положительную статистическую значимость (p -value = 0.000), а кривая графика ТПВ_{сут} (ср. знач. = 13.06 °C; σ = 0.61 °C) повышается без весомых значений.

Таким образом, оба района Сихотэ-Алинской области отличаются изменчивостью температуры и p -value. В Южно-приморском районе зимняя ТПВ_{сут} (ср. знач. = 1.25 °C) сравнительно ниже, чем в Центрально-приморском (ср. знач. = 1.56 °C), однако статистическая положительная значимость (p -value = 0.000) присутствует, в отличие от второго района (p -value = 0.772). В Центрально-приморском районе весенняя температура (ср. знач. = 4.39 °C) отличается изменчивостью относительно первого района (ср. знач. = 4.75 °C), тем не менее в обоих случаях регрессионный анализ статистически незначимый. В первом районе летняя температура не показывает наблюдаемый прирост и отсутствует статистическая значимость (p -value = 0.823), а во втором заметно увеличивается температура (ср. знач. = 18.90 °C) с 2004 г. и есть положительная статистическая значимость тренда (p -value = 0.061). В Южно-приморском районе температуры незаметно растут и тренд незначимый, а в Центрально-приморском есть заметное повышение температуры с положительной статистической значимостью (p -value = 0.000).

Северный район. Здесь волнение вод выше, чем в остальных районах, они могут достигать 2 м. Неглубокие воды до 30–40 м активно прогреваются, поэтому вегетация фитопланктона и фитобентоса протекает успешно. Район сосредоточен в холоднобореальной зоне. Зимой воды района покрыты льдом. В пелагиали процветают холоднолюбивые диатомовые водоросли, а в литорали – фукусовые (*Fucus evanescens*, *Pelvetia wrightii*) водоросли. Изменчивость ТПВ_{сут} представлена на рис. 7.

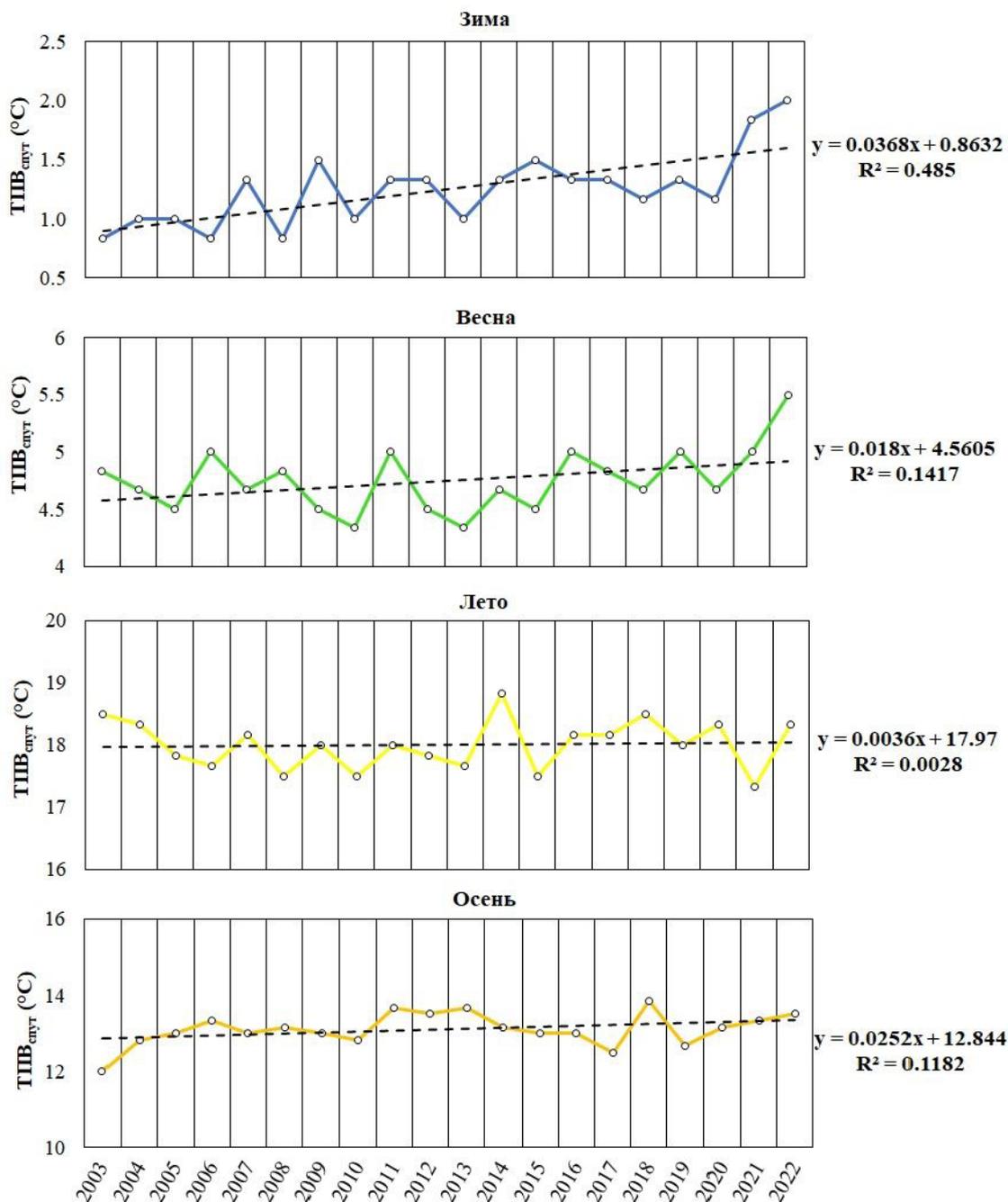


Рис. 5. Южно-приморский район Сихотэ-Алинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон

Fig. 5. Southern-Primorsky district of the Sikhote-Alin region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

Зимние данные не получены, т. к. воды скованы сплошным льдом, а сенсор спутника не настроен на детектирование ледяного ландшафта и суши. Анализ *весенней* регрессии продемонстрировал статистическую незначимость (p -value = 0.294). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 1.65 °C; σ = 0.34 °C) показывает снижение до 0.84 °C в 2004 г., а затем линия графика неуклонно продолжает увеличиваться, поднимаясь до 2.17 °C в 2014 и 2017 гг. *Летом*

получен статистически значимый тренд (p -value = 0.009). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 13.93 °C; σ = 0.66 °C) демонстрирует уменьшение до 12.83 °C в 2003 г. и увеличение до 15.67 °C в 2014 г. *Осенний* тренд не имеет статистической значимости (p -value = 0.202). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 9.97 °C; σ = 0.56 °C) сначала понизилась (9.00 °C), а затем повысилась (11.67 °C) в 2004 и 2012 гг.

В районе 2.2. *Перешеек Поясок* суточные

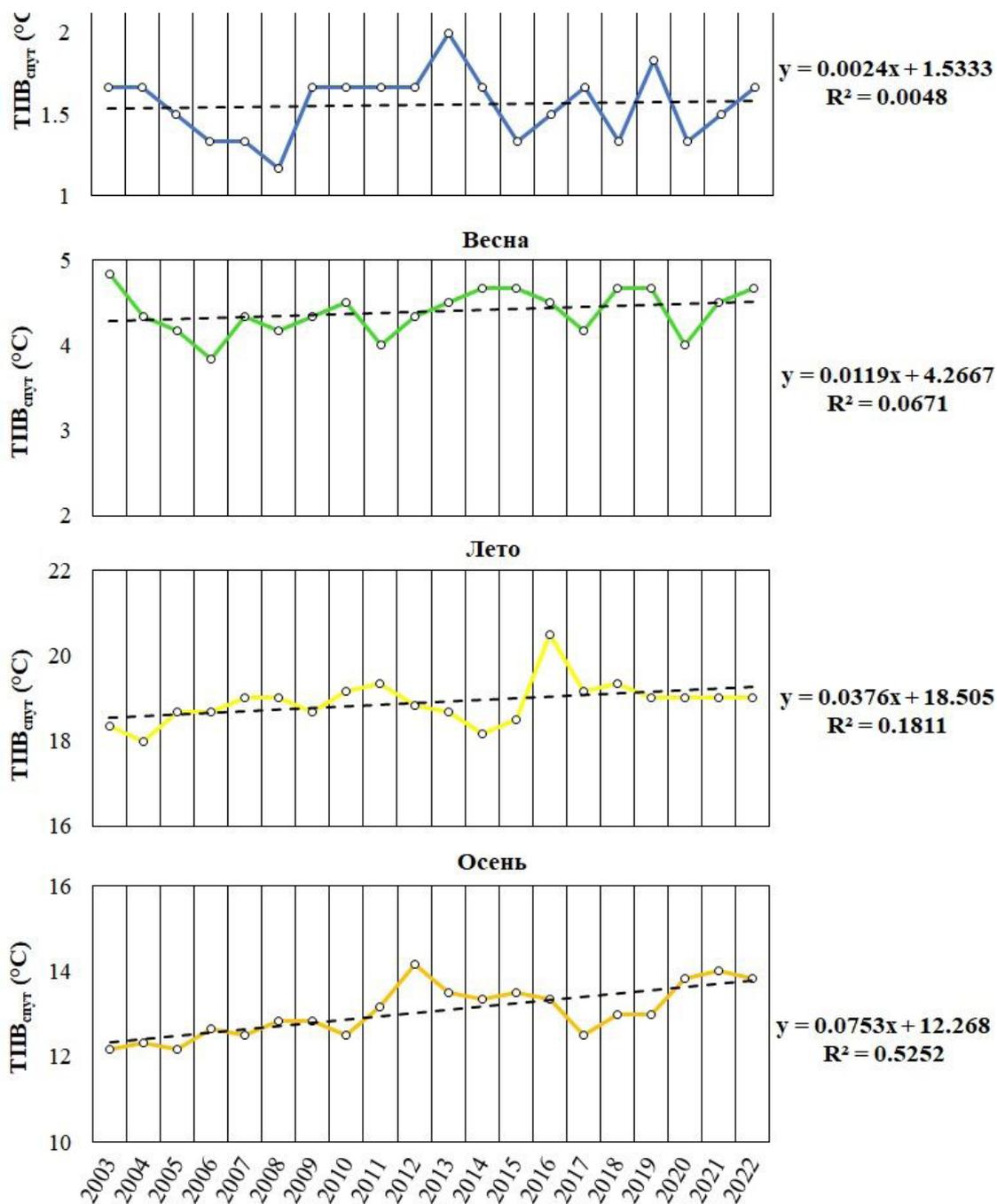


Рис. 6. Центральнo-приморский район Сихотэ-Алинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) ТПВ_{спут} за каждый сезон

Fig. 6. Central Primorsky area of the Sikhote-Alin region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

приливы достигают 1 м. Неглубокая материковая отмель интенсивно прогревается благодаря солнечной радиации, сказываясь на вегетации высших и низших водорослей. Зимой воды замерзают. Район разделен на две биогеографические зоны: по южной границе проходит холоднобореальная, а на севере – неморальная (Зенкевич, 1962). В

холоднобореальной зоне воды населены биоиндикаторами, соответствующими Центральнo-приморскому и Северному районам, а в неморальной цветут динофлагелляты – Dinoflagellata и сообщества макробентоса *Corallina pilulifera*. Далее рассмотрим изменчивость ТПВ_{спут} (рис. 8).

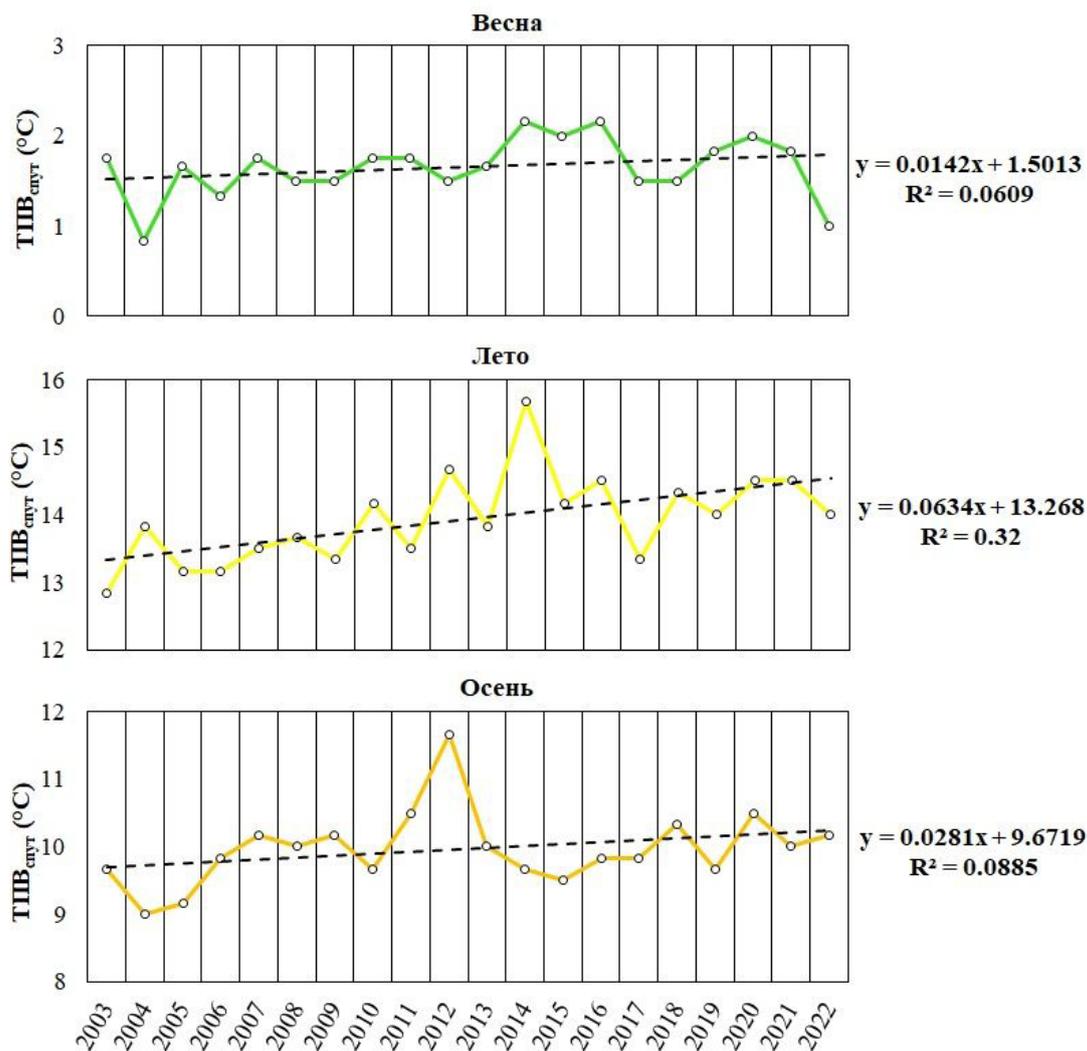


Рис. 7. Северный район островной Сахалинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $T_{\text{ПВ}}_{\text{спут}}$ за каждый сезон

Fig. 7. The Northern district of the Sakhalin Island region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

Зимние данные отсутствуют по той же причине (см. Северный район). *Весной* был получен статистически незначимый тренд (p -value = 0.173). $T_{\text{ПВ}}_{\text{спут}}$ (ср. знач. = 2.46 °C; σ = 0.22 °C) доходят до 2.00 °C в 2004 г. и возрастают до 3.00 °C в 2021 г., незначительно продолжая расти. Полученный *летний* возрастающий тренд статистически значимый (p -value = 0.051). $T_{\text{ПВ}}_{\text{спут}}$ (ср. знач. = 14.17 °C; σ = 0.38 °C) начинаются со сниженного значения 13.67 °C в 2003 г. и доходящего до 15.17 °C в 2006 и 2013 гг. Регрессионный анализ показал положительную статистическую значимость *осеннего* тренда (p -value = 0.002). $T_{\text{ПВ}}_{\text{спут}}$ (ср. знач. = 10.59 °C; σ = 0.21 °C) оказались растущими без явного перехода к снижению или повышению.

Южный район. Характерны суточные приливы, которые возрастают до 1 м. Как и в Северном районе, воды неглубокие, спо-

собствуют интенсивной инсоляции водной растительности. В зимнее время поверхностные воды не замерзают за счет теплого Цусимского течения. Район располагается в неморальной зоне. Водоросли представлены преимущественно классом динофитовых – Dinophyta, фитобентосом – Sargassum pallidum, S. miyabei и плотными сообществами Corallina pilulifera. Многолетняя и сезонная изменчивость температуры отображена на рис. 9.

Зимний тренд нисходящий статистически значимый (p -value = 0.055). $T_{\text{ПВ}}_{\text{спут}}$ (ср. знач. = 2.02 °C; σ = 0.35 °C) убывает до 1.67 °C в 2006 г. и показывает неравномерную динамику. *Весенний* тренд статистически незначимый (p -value = 0.855), $T_{\text{ПВ}}_{\text{спут}}$ (ср. знач. = 3.80 °C; σ = 0.27 °C) показывает не существенное, но наблюдаемое снижение. *Летний* тренд статистически незначим (p -value =

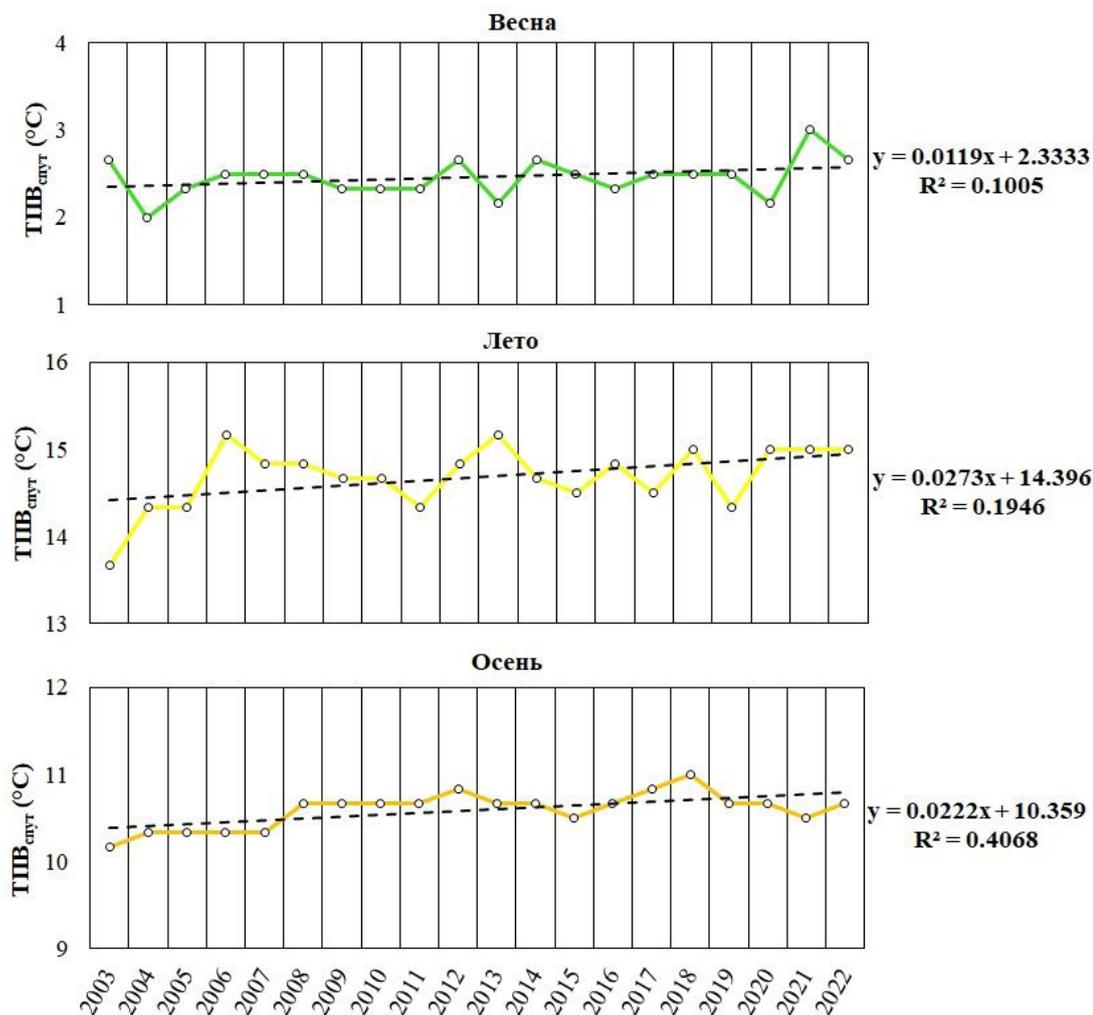


Рис. 8. Район Перешеек Поясок островной Сахалинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) ТПВ_{спут} за каждый сезон

Fig. 8. Isthmus Belt area of the Sakhalin Island Region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

0.642). ТПВ_{спут} (ср. знач. = 14.68 °C; $\sigma = 0.44$ °C) снижающаяся, и это заметно с 2014 г., когда она достигла 13.33 °C. Осенний тренд получился статистически незначимым (p -value = 0.861). ТПВ_{спут} (ср. знач. = 11.53 °C; $\sigma = 0.34$ °C) показывает краткосрочные снижения до 11.00 °C в 2003 и 2015 гг. и дальнейшие незначительные повышения.

Таким образом, в трех районах Сахалинской области прослеживается многолетняя изменчивость ТПВ_{спут} и p -value. Зимние значения не рассматриваются во всех районах, за исключением Южного района, где отмечается понижение температуры и нисходящий значимый тренд (p -value = 0.055). В Южном районе весной ТПВ_{спут} (ср. знач. = 3.80 °C) больше, в то время как в Северном районе (ср. знач. = 1.65 °C) и в районе Перешеек Поясок (ср. знач. = 2.46 °C) изменчивость ниже, а статистический тренд незначимый в трех районах (p -value = 0.294; p -value

= 0.173; p -value = 0.855). Летом аналогичный порядок ТПВ_{спут} в Южном (ср. знач. = 14.68 °C), в Перешейке Поясок (ср. знач. = 14.17 °C) и в Северном (ср. знач. = 13.93 °C) районах, но положительная статистическая значимость тренда присутствует в Северном районе (p -value = 0.009) и в Перешейке Поясок (p -value = 0.051) без Южного района (p -value = 0.642). Осенью изменчивость ТПВ_{спут} варьируется следующим образом: в Южном районе ТПВ_{спут} (ср. знач. = 11.53 °C) проявляется лучше, но с отсутствием статистической значимости (p -value = 0.861), а в районе Перешеек Поясок (ср. знач. = 10.59 °C) – средняя и со статистической значимостью (p -value = 0.002), ниже всего демонстрируется в Северном районе ТПВ_{спут} (ср. знач. = 9.97 °C) без статистической значимости (p -value = 0.202).

В области северной части Татарского пролива действуют полусуточные приливы 2.8 м. Летом благодаря циклонам, прихо-

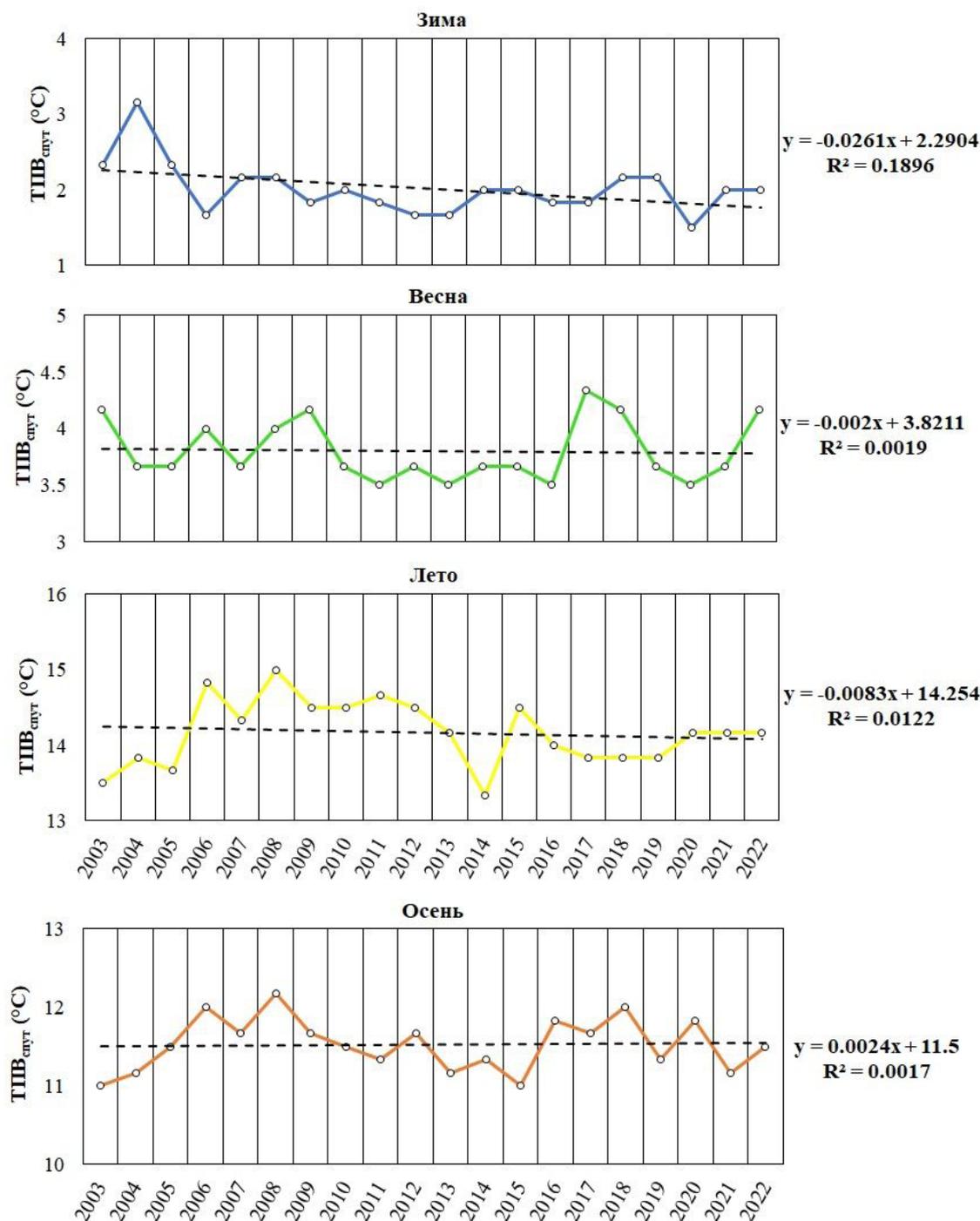


Рис. 9. Южный район Сахалинской области. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{\text{спут}}$ за каждый сезон
 Fig. 9. The Southern district of the Sakhalin region. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

дядим с летними муссонами, наблюдается сильное волнение, и в узкой части пролива высота волн может достигать 3.1 м. Зимой пролив полностью покрыт льдом, освобождается от него в начале мая. Мелководные окраины материка неглубокие до 6 м, и

воды интенсивно прогреваются в теплое время года. Пролив входит в бореальную зону, в которой циркулирует холодное течение Шренка. Биоиндикаторы представлены подводными зарослями морских трав. На рис. 10 дана изменчивость $ТПВ_{\text{спут}}$.

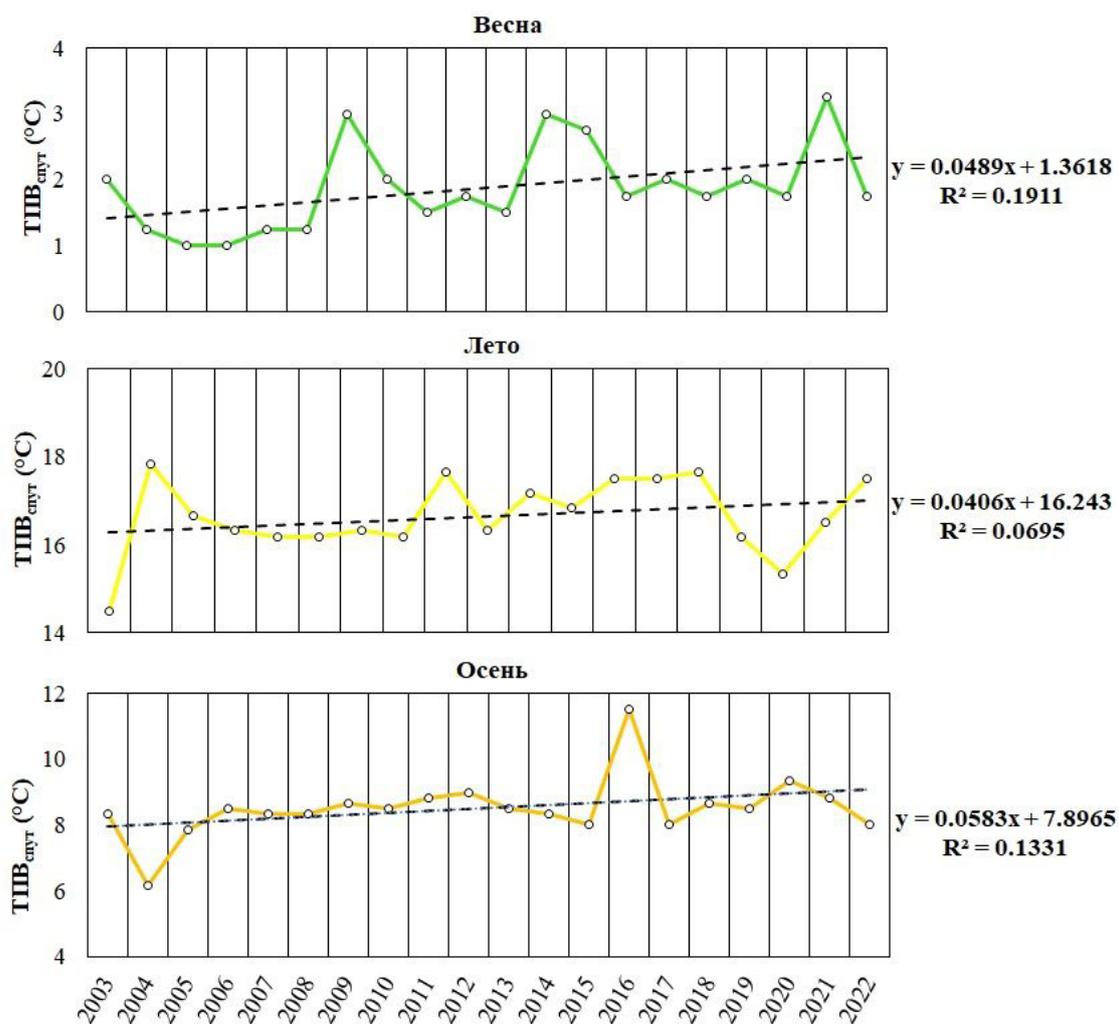


Рис. 10. Область северной части Татарского пролива. Многолетние ряды (2003–2022 гг.) $ТПВ_{спут}$ за каждый сезон

Fig. 10. The area of the northern part of the Tatar Strait. Long-term series (2003–2022) SST_{sat} for each season

Зимние значения не указаны из-за покрова льда. Регрессионный анализ показал весеннюю положительную статистическую значимость тренда (p -value = 0.053). $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 1.88 °C; σ = 0.66 °C) снижается до 1.00 °C в 2005–2006 гг. и увеличивается до 3.25 °C в 2021 г. Летом тренд статистически незначимый (p -value = 0.167), но $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 16.69 °C; σ = 0.87 °C) сначала снижается (14.50 °C в 2003 г.), а затем становится повышенной (17.83 °C в 2004 г.). Осенью статистическая значимость тренда отсутствует (p -value = 0.113), а $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 8.51 °C; σ = 0.95 °C) повышается с 7.83 °C в 2005 г. до 9.33 °C в 2020 г., зафиксированы скачки температуры с пиковыми низкими 6.17 °C в 2004 г. и 11.50 °C в 2016 г.

Таким образом, в северной части Татарского пролива в 2003–2022 гг. летние значения $ТПВ_{спут}$ (ср. знач. = 16.69 °C) самые высо-

кие, но они, как и другие сезонные показатели, завышены, поскольку с мая по середину октября р. Амур становится полноводной из-за мощных тайфунов, заносимых восточными ветрами с Тихого океана. Обильные осадки вызывают летне-осенние половодья и паводки, которые выносят минеральную взвесь в мелководья. Эти спутниковые данные требуют доработки, но майские и октябрьские температуры определяют гидрометеорологические явления в вершине северной части Японского моря.

Обсуждение

С 2003 по 2022 г. сезонные $ТПВ_{спут}$ постепенно изменяются по районам в северо-западной части Японского моря. Для проверки этой изменчивости был проведен дополнительный подсчет значений по коэффициентам вариации (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение районов по коэффициентам вариации (%) ТПВ_{сут} по сезонам

Сезон	Южно-приморский район	Центрально-приморский район	Северный район	Перешеек Поясок	Южный район	Татарский пролив
Зима	25.04	12.78	–	–	17.56	–
Весна	5.97	6.19	20.57	9.04	7.20	35.28
Лето	2.24	2.77	4.76	2.49	3.12	5.19
Осень	3.31	4.71	5.60	1.94	2.94	11.11

Из табл. 1 видно, что коэффициент вариации обладает разбросом и связан с сезонной изменчивостью ТПВ_{сут}. Столбики показывают уменьшение с зимы по осень коэффициентов, кроме области северной части Татарского пролива. С этим можно связать геологические особенности районов и океанологические условия в них, которые влияют на снижение или рост температуры. В основной части текста описываются морфоструктурные формы рельефа с продольными или поперечными берегами, а также приливно-отливные явления и сезонная изменчивость температуры. Затем рассматриваются эти три аспекта в контексте различных регионов.

В Южно-приморском районе Сихотэ-Алинской области поперечный берег испытывает тектоническую депрессию, которая создает обилие аккумулятивного материала на дне залива Петра Великого и широкий шельф. В береговой зоне этого типа температуры подвергаются продолжительной осенне-зимней конвекции. В континентальной отмели до бровки шельфа прибрежные течения возникают от циклонов с юга и антициклонов с севера (Супранович, Якунин, 1976), перераспределяя водную массу в толще и вместе с тем температуру. Коэффициент вариации (25.04 %) значительный среди всех районов за зиму, а в остальных сезонах вариационный ряд обладает однородностью значений, кроме этого, весной и летом коэффициенты 5.97 и 2.24 % являются наименьшими по районам, что говорит о точности значений температуры. В Центрально-приморском районе той же области пролегает продольный поднимающийся берег, сопровождающий холодное Западно-Приморское течение, здесь немалую роль играют также осенние апвеллинги, вызванные муссонами с востока. Разброс в ряде ТПВ_{сут} средний и низкий, демонстрирующий однородность ряда.

В районах Сахалинской области преобладают продольные берега с замедленным геологическим поднятием. В Северном районе с ноября по середину апреля воды по-

крыты льдом, а с наступлением майского тепла р. Амур и ее притоки приносят теплоемкие воды, которые после летних тайфунов становятся половодьями и паводками, повышающими уровень воды в Амурском проливе. В акватории проявляются весенние апвеллинги, которые возникают из-за неоднородности тепла после протаивания льда в конце марта и продолжаются в апреле. Осенью с северо-запада подступают циклонические завихрения, которые выталкивают потоки воды с лимана в сторону данного района. Летний (4.76 %) и осенний (5.60 %) разброс ТПВ_{сут} показывает однородность ее ряда, кроме весны (20.57 %), где она более значительна. Район Перешеек Поясок обладает поперечным типом берега с тектонической депрессией. Холодное Западно-Сахалинское и теплое Цусимское течения формируют межсезонную конвекцию вод за счет припайного и дрейфующего льда с севера в холодное время года, а прогретые воды Цусимского течения – в теплое. Летние муссонные ветра, приходящие с юга, орошают водную массу, что делает ее более распресненной, а осенью циклонические водные массы с севера снижают ее температуру. Разброс значений в ряде коэффициентов за весну (9.04 %) и лето (2.49 %) снижает превышение разброса, а коэффициент за осень (1.94 %) наименьший во всех районах. Южному району свойственны неглубокие морские воды из-за высоких поднимающихся берегов, шельф узкий. Конвергенция вод здесь протекает быстро, а зимой воды никогда не замерзают, кроме 2003–2005 гг., когда за март и начало апреля на КС были обнаружены льды. Только зимой коэффициент вариации (17.56 %) показывает средненизкий разброс ТПВ_{сут}.

Область северной части Татарского пролива является самой мелководной. Ее окраина – это мелководный желоб, заполняемый мощными водными стоками р. Амур, которые становятся полноводными благодаря приходу мощных тайфунов с Тихого океана. Зимой пролив покрыт льдом. В Амурском

лимане спутниковые данные в большинстве своем искажены, поскольку концентрация минеральной взвеси замутняет воду. Коэффициенты вариации устроены так, что весенний (35.28 %) разброс велик относительно всех районов и он же показателен в статистических расчетах. В остальные сезоны коэффициенты демонстрируют лучшую однородность.

Заключение

Космический мониторинг сезонной изменчивости температуры поверхности воды за многолетний (2003–2022 гг.) период претерпевает современную адаптацию к нестандартным научным задачам. Ко всему этому добавляется ландшафтно-биономическое районирование – теоретический метод профессора К. М. Петрова. Его методика помогает ограничить исследуемые районы в береговой зоне северо-западной части Японского моря. Эти районы становятся затем полигонами на цифровой карте в ArcGIS, их батиметрические профили оцифровыва-

ются в Surfer и рассчитываются в SeaDAS и Excel.

Комплексный способ может предопределять изменчивость температуры поверхности воды и уровень формирования биопродуктивности морских экосистем, а также описывать экологические факторы и условия каждого района. Было установлено, что во всех районах происходит медленное увеличение температур за каждый сезон на протяжении 20 лет. Многосторонний статистический анализ помогает определить приближенные значения, делая их более точными, в выделенных районах.

В наши дни экспериментальные методы применяются как практические инструменты для долгосрочного прогнозирования изменений температуры в регионе. Благодаря спутниковым данным о концентрации хлорофилла-а в фитопланктоне можно было бы изучить его связь с ТПВ^{спут} и использовать эти знания для прогнозирования продуктивности морских экосистем в прибрежной зоне.

Библиография

- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Японское море: гидрометеорологические условия / А. С. Васильева, Ф. С. Терзиева, А. Н. Косарева. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. Т. 8, вып. 1. 392 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей. Японское море: гидрохимические условия и океанографические основы формирования биологической продуктивности / Ф. С. Терзиева, П. Я. Тищенко. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. Т. 8, вып. 2. 264 с.
- Зенкевич Л. А. Биология морей СССР. М.: Наука, 1962. 741 с.
- ДВНИГМИ. Гидрологические характеристики. Колебания уровня. Приливные явления URL: <http://pacificinfo.ru/data/cdrom/10/html/7.htm> (дата обращения: 06.05.2024).
- Медведев В. С. Исследования по динамике и морфологии берегов залива Петра Великого в Японском море. Владивосток, 1961. Т. 8.
- Моря и океаны. Японское море. URL: <http://oceangid.blogspot.com/2013/04/japonskoemore.html?m=1&ysclid=l1brskzuvz> (дата обращения: 23.04.2024).
- Петров К. М. Подводные ландшафты: теория, методы, исследования. Л.: Наука, 1989. 125 с.
- Петров К. М., Поздеев В. Б. Подводные ландшафты и фитобентос у берегов Южного Сахалина. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1992. 128 с.
- Петров К. М. Биология океана. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2004. 242 с.
- Петров К. М. Принципы биономического районирования береговой зоны и шельфа Мирового океана // Океанология. М.: ИО РАН, 2020. Т. 60, № 3. С. 381–392. DOI: 10.31857/S0030157420030089
- Петров К. М. Морская экология: экосистемы и подводные ландшафты: Учебное пособие для бакалавров. Самара: Ай Пир Медиа, 2023. 172 с.
- Ракитин Т. Д. Сезонные и региональные особенности продуктивности фитопланктона в северной части Японского моря // Морские исследования и образование – MARESEDU-2022: Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. Тверь: ПолиПРЕСС, 2022. С. 50–53.
- Суетин В. С., Суслин В., Королева С. Н., Кучерявый А. А. Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SeaWiFS // Морской гидрофизический журнал. 2002. № 6. С. 44–54.
- Супранович Т. И., Якунин Л. П. Гидрология залива Петра Великого. Владивосток: ДВО АН СССР, 1976. № 22. 199 с. (Труды ДВНИГМИ. Вып. 22).
- Soutward A. J. Life on the sea-shore. Heinemann Educ., 1965. 148 p.
- NASA. OceanColorWEB. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/aqua/> (дата посещения: 23.04.2024).
- Sanzhong L., Weiwei D., Xiaoyu G., et al. Pacific-Asian Tectonics: Preface // Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 226. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103946

Victor K. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview // Journal of Coastal Research. 2011. Vol. 27 (1). P. 2–17. DOI: 10.2307/25790484

Xu Z. H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region // Acta Seimol. Sin. 2001. No 14. P. 524–533. DOI: 10.1007/BF02718059

Благодарности

Автор выражает благодарность почетному профессору Санкт-Петербургского государственного университета, д. г. н. Кириллу Михайловичу Петрову за справедливые замечания и моральную поддержку, а также рецензентам за их внимательность.

VARIABILITY OF WATER SURFACE TEMPERATURE IN THE COASTAL ZONE OF THE NORTHWESTERN PART OF THE SEA OF JAPAN

RAKITIN
Tikhon Dmitrievich

*Saint-Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya Embankment,
St. Petersburg, 199034, Russia, gatwar47@mail.ru*

Keywords:

Sea of Japan
coastal zone
landscape-biogenic
zoning
morphostructures
space monitoring
seasons
long-term variability
temperature

Summary: The variability of the temperature regime of surface waters was studied in the coastal zone and on the shelf in the northwestern part of the Sea of Japan. The temperature gradient is limited by morphostructural areas, where the main fundamental unit is considered to be the seascape. In the coastal zone in the studied part of the sea, observations of temperature variability in the surface layer were carried out, and continue to be carried out by specialists from: V.I.Ilyichev Institute of Technical Sciences of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Pacific Branch of VNIRO, IVEP Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, etc., but the data collection is carried out irregularly and in situ, and researchers do not take into account the landscape factor. The importance of this article lies in an integrated approach using the method of landscape and ecological zoning and space monitoring data. Coastal typing in the northwestern part of the Sea of Japan makes it possible to mark areas with different water surface temperatures, and remote sensing of the ocean from a satellite helps to mark their spatial and temporal distribution from 2003 to 2022. To date, it is impossible to say with certainty that there is a similar and detailed algorithm for processing satellite data using Surfer, SeaDAS and ArcGIS software. In the future, the obtained data will be used to study its effect on the dynamics of phytoplankton productivity. The processed data will allow us to show the probability of climate variability in the region and the dynamics of biological productivity in the marine ecosystem within the coastal zone of the sea.

Received on: 12 February 2025

Published on: 02 April 2025

References

- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. The Sea of Japan: hydrochemical conditions and oceanographic foundations of the formation of biological productivity, F. P. Terzieva, P. Ya. Tischenko. SPb.: Gidrometeoizdat, 2004. T. 8, vyp. 2. 264 p.
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. The Sea of Japan: hydrometeorological conditions, A. P. Vasil'eva, F. P. Terzieva, A. N. Kosareva. SPb.: Gidrometeoizdat, 2003. T. 8, vyp. 1. 392 p.
- MI. Hydrological characteristics. Fluctuations in the level. Tidal phenomena. URL: <http://pacificinfo.ru/data/cdrom/10/html/7.htm> (data obrascheniya: 06.05.2024).
- Medvedev V. S. Research on the dynamics and morphology of the shores of Peter the Great Bay in the Sea of Japan. Vladivostok, 1961. T. 8.
- NASA. OceanColorWEB. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/data/aqua/> (data posescheniya: 23.04.2024).
- Petrov K. M. Pozdeev V. B. Underwater landscapes and phytobenthos off the coast of Southern Sakhalin. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. un-ta, 1992. 128 p.
- Petrov K. M. Bionomy of the ocean. SPb.: Izd-vo SPb. un-ta, 2004. 242 p.
- Petrov K. M. Marine ecology: Ecosystems and underwater landscapes: study guide for bachelors. Samara: Ay Pir Media, 2023. 172 c.
- Petrov K. M. Principles of bionomic zoning of the coastline and the shelf of the World Ocean, *Okeanologiya*. M.: IO RAN, 2020. T. 60, No. 3. P. 381–392. DOI: 10.31857/S0030157420030089
- Petrov K. M. Underwater landscapes: theory, methods, research. L.: Nauka, 1989. 125 p.
- Rakitin T. D. Seasonal and regional characteristics of phytoplankton productivity in the northern part of the Sea of Japan, *Morskije issledovaniya i obrazovanie – MARESEDU-2022: Sbornik tezisev dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii*. Tver': PoliPRESS, 2022. P. 50–53.
- Sanzhong L., Weiwei D., Xiaoyu G., et al. Pacific-Asian Tectonics: Preface, *Earth-Science Reviews*. 2022. Vol. 226. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103946

- Seas and oceans. The Sea of Japan. URL: <http://oceangid.blogspot.com/2013/04/japonskoemore.html?m=1&ysclid=l1brskzuvz> (data obrascheniya: 23.04.2024).
- Soutward A. J. *Life on the sea-shore*. Heinemann Educ., 1965. 148 p.
- Suetin V. S. Suslin V. Koroleva S. N. Kucheryavyy A. A. Estimation of the variability of optical properties of water in the Black Sea in the summer of 1998 using this SeaWiFS satellite instrument, *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2002. No. 6. P. 44–54.
- Supranovich T. I. Yakunin L. P. *Hydrology of Peter the Great Bay*. Vladivostok: DVO ANSSR, 1976. No. 22. 199 p. (Trudy DVNIGMI. Vyp. 22).
- Victor K. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview, *Journal of Coastal Research*. 2011. Vol. 27 (1). P. 2–17. DOI: 10.2307/25790484
- Xu Z. H. A present-day tectonic stress map for eastern Asia region, *Acta Seimol. Sin.* 2001. No 14. P. 524–533. DOI: 10.1007/BF02718059
- Zenkevich L. A. *Biology of the seas of the USSR*. M.: Nauka, 1962. 741 p.