

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗАПАСА КАМЧАТСКОГО
КРАБА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SDM МЕТОДОВ**

© 2025 г. С.В. Баканев (spin: 9140-2907)

Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»
(«ПИНРО» им. Н.М. Книповича), Россия, Мурманск, 183038
E-mail: bakanev@pinro.vniro.ru

Поступила в редакцию 26.05.2025 г.

В основу исследования положен метод стандартизации оценок запаса камчатского краба в Баренцевом море с учётом пространственно-временной изменчивости, построенный на базе обобщённых аддитивных моделей со смешанными эффектами (GAMM) в рамках пакета sdmTMB (R). Анализ данных специализированных и экосистемных съёмок (2019–2024 гг.) выявил ключевые предикторы распределения вида: придонная температура (5–7°C), глубина (25–150 м) и удалённость от берега (0–150 км). Установлено, что переход к экосистемным съёмкам снижает оценки плотности на 89%, что подчёркивает необходимость стандартизации методов. Прогноз в рамках климатического сценария SSP5-8.5 показал смещение ареала краба к северо-востоку, включая прибрежные зоны архипелага Новая Земля, к 2100 г. Результаты демонстрируют, что учёт пространственно-временной автокорреляции и ансамблевое моделирование повышают точность оценок, обеспечивая основу для адаптивного управления ресурсами в условиях климатической нестабильности.

Ключевые слова: камчатский краб, Баренцево море, пространственно-временное моделирование, GAMM, оценка промысловых запасов, климатические сценарии, абиотические факторы, ансамблевое прогнозирование, SDM, экологическая ниша.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа развивает методологию, представленную в предыдущих исследованиях по пространственно-временной стандартизации индекса численности промыслового запаса камчатского краба (*Paralithodes camtschaticus*) в ИЭЗ России Баренцева моря (Баканев, Стесько, 2024). В указанной работе авторы впервые применили обобщённую аддитивную модель со смешанными эффектами (GAMM), реализованную в библиотеке sdmTMB статистической среды R, для интеграции пространственно-временной автокорреляции и учёта ключевых абиотических факторов (температура, глубина). Это позволило минимизировать систематические ошибки в

оценках плотности запаса, особенно в районах с фрагментарным покрытием данными, за счёт экстраполяции на необследованные акватории с использованием гауссово-марковских случайных полей (Anderson et al., 2022).

Камчатский краб, являющийся одним из ключевых промысловых ракообразных в северных морях, играет значительную роль как в экосистемах, так и в экономике прибрежных регионов. Его интродукция в Баренцево море в середине XX в. привела к формированию устойчивой популяции, динамика которой в последнее десятилетие, вероятно, находится под влиянием климатических изменений и антропогенного пресса. Потепление вод, сокращение ледового покрова и усиление

ние адвекции атлантических вод вероятно модифицируют условия обитания вида, провоцируя смещение ареала и изменение структуры популяции. Эти процессы создают новые сложности для управления ресурсом, требующие точных и адаптивных методов оценки запасов, учитывающих как пространственно-временную неоднородность данных, так и взаимодействие биотических и абиотических факторов.

Традиционные подходы к оценке численности, основанные на данных траловых съёмок, сталкиваются с рядом ограничений. К ним относятся неоднородность покрытия акватории, различия в методологиях съёмок (например, специализированные и тотальные экосистемные), а также влияние случайных шумов, связанных с изменчивостью условий среды. Особую сложность представляет экстраполяция данных на непокрытые участки, где отсутствие наблюдений может приводить к систематическим ошибкам в расчётах индексов плотности. Кроме того, прогнозирование долгосрочных изменений ареала вида в условиях климатических трансформаций требует интеграции комплексных моделей, объединяющих биологические, океанографические и климатические данные.

В этом контексте пространственно-временное моделирование распределения видов (Species Distribution Modeling, SDM) и обобщённые аддитивные модели со смешанными эффектами (GAMM) демонстрируют значительный потенциал (Кулик и др., 2025; Anderson et al., 2022). Эти методы позволяют учесть нелинейные зависимости между факторами среды и плотностью популяции, пространственную автокорреляцию, а также временную динамику, что критически важно для минимизации смещений в оценках. Однако их применение к промысловым объектам в северных морях, таким как камчатский краб, остается недостаточно изученным, особенно в части валидации моделей при различных сценариях изменения среды и интеграции разнородных данных съёмок.

Настоящее исследование направлено на дальнейшее развитие и апробацию методологии пространственно-временной стандартизации оценки запаса камчатского краба в Баренцевом море, основанной на обобщённых аддитивных смешанных моделях (GAMM) с применением пакета sdmTMB. В задачи работы входило: анализ влияния ключевых абиотических факторов (температура, глубина, удалённость от берега) и методик экосистемной и специализированной съёмок на оценки плотности популяции; оценка эффективности моделей с пространственно-временными случайными эффектами в сравнении с традиционными подходами; прогнозирование изменений ареала вида в рамках климатического сценария SSP5-8.5 (Eyring et al., 2016) с использованием ансамблевого моделирования.

Научная новизна исследования заключается в комбинации двух съёмок (экосистемной и специализированной) для оценки динамики индекса промыслового запаса и методов SDM и GAMM для учёта пространственно-временной автокорреляции, а также в применении ансамблевого подхода к прогнозированию, интегрирующего множественные алгоритмы машинного обучения. Практическая значимость работы связана с повышением точности оценки состояния промыслового запаса, что необходимо для разработки адаптивных стратегий управления рыболовством в условиях климатической нестабильности. Результаты исследования также вносят вклад в понимание экологических последствий потепления Арктики, включая риски конкуренции с аборигенными видами и трансформацию бентосных сообществ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Основу данного исследования составили данные двух типов траловых съёмок, выполненных в южной части баренцевоморского шельфа в августе-сентябре 2019–2024 гг.: специализированных исследований камчатского краба и тотальной экосистемной съёмки. Район работ охватывал акваторию Баренцева

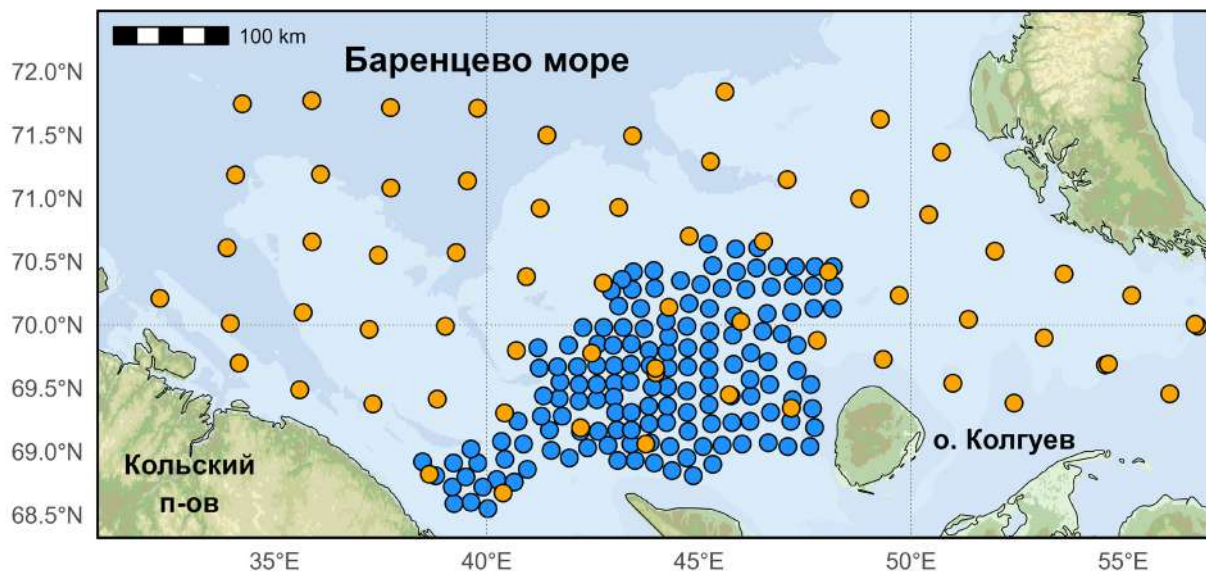


Рис. 1. Расположение траловых станций в Баренцевом море в ходе специализированных съёмок камчатского краба (синие точки) и экосистемных съёмок (оранжевые точки) за период 2019–2024 гг. (данные за 2024 г. в качестве примера).

моря и сопредельных вод в границах 30°–60° в. д. и 68°–72° с. ш., что соответствует площади приблизительно 300 тыс. км² (рис. 1).

Специализированные съёмки проводили с применением донного трала модели 22М, оснащённого кутком с ячейей 45 мм и рубашкой с ячейей 16 мм. Использовали 12-метровый грунттроп «Rockhopper» с дисками диаметром 400 мм. Продолжительность траления составляла 15 мин при средней скорости 2,6 узла. В среднем за одну съёмку выполняли 123 траления, охватывая акваторию площадью 56,7 тыс. км².

В рамках экосистемных съёмок материал собирали посредством донного трала «Campelen» с горизонтальным раскрытием 15 м и вертикальным 6 м; размер ячейи в кутке составлял 22 мм. Траления длились 15 мин со средней скоростью 2,5 узла. Общее количество донных тралений за съёмку варьировало от 311 до 649. Для целей данного анализа учитывались только станции, расположенные южнее 72° с.ш., поскольку именно в этом районе периодически отмечались уловы камчатского краба. В результате на исследуемой акватории (260,4 тыс. км²) в среднем анализировалось по 66 тралений.

Все полевые исследования выполнялись в соответствии со стандартными методиками (Изучение экосистем..., 2004). У отловленных особей измеряли ширину карапакса (ШК, мм), определяли пол, у самцов – межличностную категорию покровов, а у самок — стадию зрелости икры. К промысловым самцам, учитывавшимся при расчёте индекса запаса, относились особи с ШК ≥ 150 мм. Всего было проанализировано 53 227 особей краба, из них 24 975 – промысловые самцы.

Для пространственной стандартизации индекса промыслового запаса с использованием единой площади исследовательской съёмки и построения распределения вида (species model distribution; SDM) использовалась обобщённая аддитивная модель смешанного эффекта (GAMM) с пространственно-временными Гауссовскими-Марковскими случайными полями (GMRF). Случайные поля учитывают пространственную и временную автокорреляцию между тралениями, а также оценивают неучтённые компоненты условий среды обитания, изменяющиеся во времени (Shelton *et al.*, 2014). GAMM реализована в библиотеке sdmTMB (Anderson *et al.*, 2022).

статистической среды R (<https://www.R-project.org/>), где индекс плотности моделировался с использованием распределения Твиди с функцией логарифмической связи, поскольку плотность положительна, непрерывна и содержит нули (Tweedie, 1984; Shono, 2008; Anderson et al., 2019).

Помимо категориальных предикторов – года (YEAR) и типа съёмки (SURV), – в модель плотности включили непрерывные переменные, потенциально влияющие на распределение промыслового запаса: придонную температуру (TEMP), глубину (DEPTH) и удалённость от берега (DIST). Наилучшая модель отбиралась путём последовательного тестирования различных комбинаций этих параметров. Окончательный выбор был сделан в пользу варианта с минимальным значением информационного критерия Акаике (AIC).

Для построения долгосрочных прогнозов распределения запаса камчатского краба в Баренцевом море на периоды 2050–2060 и 2090–2100 гг. был применен ансамблевый подход, интегрирующий в данном исследовании 11 алгоритмов пространственно-временного анализа (таких как Random Forest, MaxEnt, GAM).

Входные данные, отражающие как текущие, так и прогнозируемые условия среды, были загружены с веб-портала Bio-ORACLE и основаны на результатах моделирования общей циркуляции атмосферы и океана (Assis et al., 2024). Данный репозиторий содержит 26 растровых слоёв, характеризующих физические, химические, биологические и топографические параметры морской среды в глобальном масштабе. Все данные имеют единую систему координат, пространственное разрешение 0,05 градуса и представлены с десятилетним временным шагом в интервале с 2000 по 2100 гг. Ключевые физические, химические и биологические переменные (в количестве 19) сформированы в шесть наборов, соответствующих сценариям общего социально-экономического развития (Shared Socio-Economic Pathways, SSP; Frame et al., 2018) на период

2020–2100 гг., которые были рассчитаны с привлечением климатической модели CMIP6 (Eyring et al., 2016).

Настоящее исследование направлено на моделирование потенциального ареала камчатского краба в Баренцевом море в среднесрочной (середина XXI в.) и долгосрочной (конец XXI в.) перспективе в рамках сценария SSP5-8.5. Данный прогноз предполагает инерционное развитие экономики, сопряжённое с активным сжиганием ископаемого топлива, что, согласно модельным оценкам, вызовет экстремальное потепление климата: ожидаемое повышение глобальной температуры к 2100 г. составит $+4.3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.7^{\circ}\text{C}$) (Notz, 2020). Указанный сценарий расценивается как наименее худший с точки зрения последствий, но при этом наиболее релевантный для эмпирической оценки экологических угроз.

На подготовительном этапе для идентификации подходящих местообитаний проводился анализ доли объяснённой дисперсии в встречаемости вида, обусловленной абиотическими параметрами. Эта задача решалась с помощью обобщённых аддитивных моделей (GAM) с последующим построением кривых отклика, отражающих вероятность встречаемости краба в зависимости от условий среды. Использовались как данные платформы Bio-ORACLE, так и результаты собственных измерений температуры, солёности и глубины в периоды экосистемных съёмок. Под встречаемостью вида в контексте работы понимается отношение числа успешных обнаружений к общему количеству учётных попыток (уловов) в заданных экологических условиях. Визуализация кривых зависимости от наиболее информативных предикторов выполнялась с применением пакета visreg для R (Breheny, Burchett, 2017). Для исключения мультиколлинеарности на этапе построения моделей проводился анализ корреляций между биоклиматическими переменными, и в итоговые расчёты включались базовые предикторы с минимальными значениями фактора инфляции дисперсии (VIF) (Шитиков, 2021; Guisan, 2017).

Для анализа современного и прогнозируемого распространения крабов, а также выявления влияющих на него абиотических факторов, был применён ансамблевый подход на основе картографических моделей распределения видов (Species Distribution Model, SDM), реализованный в пакете Biomod2 для R (Thuiller, 2003). Оценка моделей проводилась методом стократной перекрёстной проверки (кросс-валидации) со случайным разделением исходных данных на обучающую (70%) и тестовую (30%) выборки. Данная процедура обеспечивает калибровку моделей и проверку их предсказательной силы на внутренних и внешних данных (Мастицкий, Шитиков, 2014). Качество моделей-кандидатов определялось с помощью метрики AUC (Area Under the ROC Curve; площадь под ROC-кривой) – непараметрического критерия, применяемого для оценки прогностической эффективности моделей (Fielding, Bell, 1997). В окончательный ансамбль включались модели, значение AUC которых превышало 0,7 (Hosmer, Lemeshow, 2000). Ансамблевые модели для прогнозирования ареала камчатского краба валидировались с использованием того же набора статистик, что и индивидуальные: AUC, TSS (True Skill Statistics, критерий Пирса-Обухова) (Киктев и др., 2021; Allouche et al., 2006), чувствительность (доля верно предсказанных присутствий) и специфичность (доля верно предсказанных отсутствий) (Pearson, 2007).

Функциональные связи между переменными среды и вероятностью распространения гидробионтов были детализированы с помощью анализа относительной важности предикторов и графиков их влияния. Количественная оценка вклада каждого фактора осуществлена на основе метрики относительной важности, рассчитываемой с использованием процедуры случайных перестановок (permutation importance) (Fisher, 1935). Метод основан на анализе корреляции между прогнозами, полученными на основе исходного набора данных и набора с рандомизированными значениями целевой переменной. Чем

сильнее снижается корреляция, тем выше значимость проверяемой переменной, и наоборот (Mielke, Berry, 2001). Площадь общего ареала рассчитывалась для акваторий, где вероятность встречаемости вида превышала 50% (Иогансен, Файзова, 1978).

Визуализация результатов и весь спектр статистических расчётов были выполнены в программной среде R с привлечением следующих пакетов: biomod2, ggOceanMaps, ggplot2, ggspatial, marmap, mgcv, sf, stars, tidyverse, tmap, rnaturalearth, visreg.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе анализа взаимосвязи вероятности встречаемости камчатского краба, рассчитанной по данным экосистемных съёмок, и параметров среды, полученных с репозитория BioORACLE, была оценена доля объяснённой дисперсии с применением обобщённых аддитивных моделей (GAM). Наибольший вклад продемонстрировали параметры придонной температуры воды (2–26%), глубина (2–24%), ледовитость (6–18%), солёность (10–44%) и другие геохимические показатели: pH (1–28%), концентрация кислорода (12–21%), нитратов (2–45%) и фосфатов (2–47%). Оставшиеся абиотические факторы продемонстрировали незначительный вклад в модель, их прогностическая сила не превышала 5–7%. Наибольшая объясняющая способность среди термических индикаторов была характерна для средней температуры самого холодного месяца (24,5%) и минимальной годовой температуры (24,2%). Анализ мультиколлинеарности показал, что большинство биоклиматических параметров (придонная температура, ледовитость, концентрация кислорода, нитратов и фосфатов) образуют тесно связанную группу, изменения в которой в значительной степени определяются адвекцией тепла течениями и уровнем солнечной радиации. Анализ выявил чёткий температурный оптимум камчатского краба с пиком встречаемости при 5–7°C (рис. 2А). Вид демонстрирует плавное снижение встречаемости при падении при-

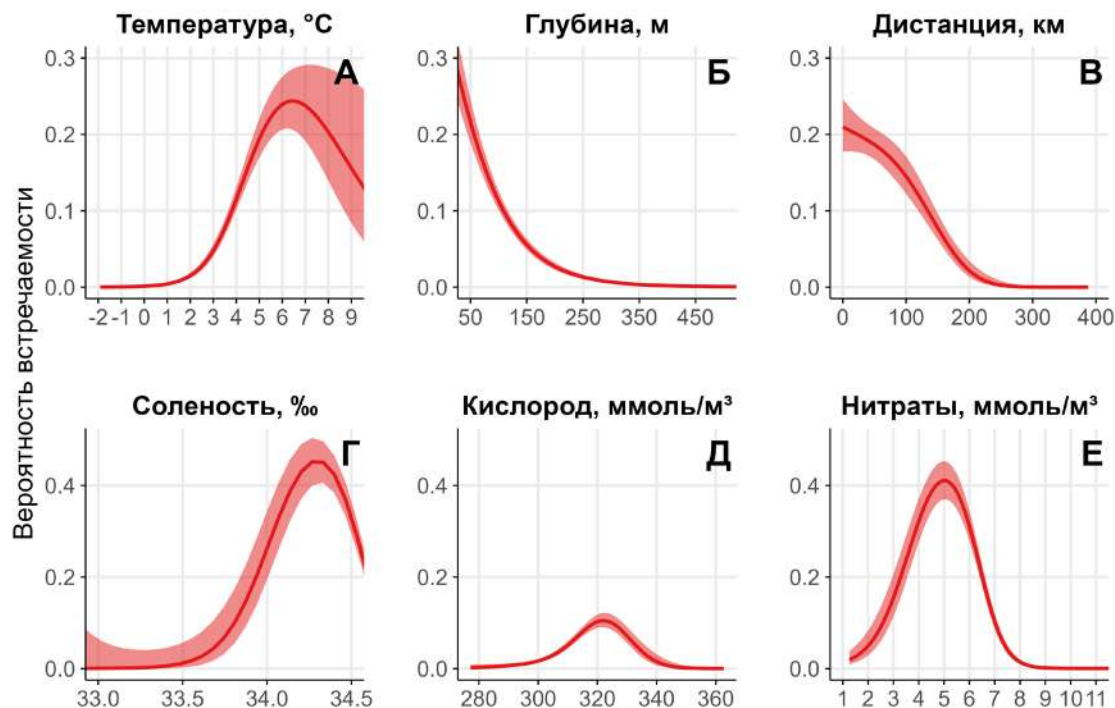


Рис. 2. Зависимость вероятности встречаемости камчатского краба в Баренцевом море и сопредельных водах от абиотических факторов по данным GAM-анализа: (А – придонная температура; Б – глубина; В – дистанция до берега; Г – придонная солёность; Д – концентрация растворённого кислорода; Е – концентрация нитратов).

донных температур от 5 до 0°C, что подчёркивает его чувствительность к экстремальным условиям.

Камчатский краб тяготеет к мелководным зонам (25–150 м) в радиусе 0–150 км от береговой линии (рис. 2Б, В). Его распространение ограничено влиянием атлантических вод, что объясняет связь с солёностью 33,9–34,6‰ (рис. 2Г). Встречаемость вида тесно коррелирует с концентрацией нитратов (3–7 ммоль/м³) и фосфатов, что отражает его предпочтение акваторий южной части Баренцева моря с узким диапазоном биогенов. Связь с первичной продукцией (37,9%) и солёностью (44,1%) подчёркивает зависимость от зон смешения водных масс, формирующих экологические ниши с высокой трофической базой.

С увеличением концентрации кислорода свыше 250 ммоль/м³ встречаемость краба снижается, так как такие районы характеризуются низкими температурами, выходя-

щими за пределы его термического оптимума (рис. 2Д).

Таким образом, распределение камчатского краба определяется взаимодействием атлантических и арктических вод, формирующих градиенты температуры, солёности и биогенных веществ. Его экологическая ниша сосредоточена в относительно тёплых, солёных и продуктивных акваториях, что ограничивает проникновение в восточные и центральные районы моря. Для последующего анализа промыслового запаса камчатского краба в данном исследовании применяется пакет sdmTMB, предназначенный для пространственно-временного моделирования. В модель вошли три абиотических предиктора, выявленные как наиболее значимые в ходе предварительного GAM-анализа: придонная температура, глубина и удалённость от берега. Остальные параметры (ледовитость, солёность, концентрация кислорода, биогены) исключены, поскольку их влияние

статистически коррелирует с учтёнными переменными и опосредовано через них. Такой подход минимизирует мультиколлинеарность и позволяет сосредоточиться на основных драйверах распределения вида при прогнозировании состояния промыслового запаса.

Анализ выявил существенное влияние типа съёмки (SURV) и межгодовой изменчивости (YEAR) на пространственное распределение плотности краба (табл. 1). Модель, включающая категориальные эффекты года, типа съёмки, сглаживающие функции глубины и температуры, а также пространственно-временные случайные эффекты (IID), продемонстрировала наилучшее соответствие данным (AIC = 9936,47). Альтернативные модели с автокорреляционной структурой AR1 ($\Delta AIC = +0,81$) или без пространственно-временного компонента ($\Delta AIC = +70,27$) показали статистически значимое ухудшение качества подгонки.

Тип съёмки оказался ключевым фактором: переход от специализированной к экосистемной съёмке ассоциировался со снижением плотности запаса на 89% (коэффициент: -2,23; SE = 0,16; $p < 0,001$). Межгодовые различия проявлялись в вариациях фиксированных эффектов для 2020–2024 гг. (коэффициенты: 5,50–4,50; SE = 0,24–0,33; $p < 0,001$),

что согласуется с динамикой популяций, наблюдаемой на исследовательской акватории.

Сглаживающие эффекты глубины и температуры, хотя и улучшали AIC модели, не достигли статистической значимости ($p > 0,05$). Визуализация частичных эффектов выявила нелинейный характер зависимости плотности распределения промыслового запаса от глубины с максимумом на средних значениях, однако широкие доверительные интервалы указывали на высокую неопределённость оценок (рис. 3). Стоит отметить, что кривые зависимости существенно отличаются от тех, что изображены на рисунке 2, так как построены на данных не только экосистемных съёмок, покрывающих всю акваторию Баренцева моря, но и специализированных съёмок, охватывающих ограниченный район основных промысловых скоплений.

Исключение пространственно-временного компонента привело к артефактам: завышению пространственной вариации (SD = 2,36) и нереалистично большому диапазону пространственной корреляции (191 км), подчёркивая необходимость учёта временной динамики. Коллинеарность между глубиной и температурой ($r = 0,65$) может маскировать их индивидуальные эффекты, что требует даль-

Таблица 1. Тип и ключевые характеристики тестируемых моделей пространственно-временной стандартизации промыслового запаса камчатского краба в Баренцевом море в 2019–2024 гг.

Модель	AIC	Пространственный SD	Временной эффект (SD)	Matern range* (км)	Сглаживания (DEPTH/TEMP)
YEAR + SURV + s(DEPTH) + s(TEMP) (spatiotemporal = IID)	9936,47	0,84	0,93 (IID)	32,46	0,85 ($p=0,23$) / 0,94 ($p=0,23$)
YEAR + SURV + s(DEPTH) + s(TEMP) (spatiotemporal = AR1)	9937,28	0,81	0,96 (AR1, $\rho=0,16$)	32,44	0,85 / 0,94
YEAR + SURV + s(DEPTH) + s(DIST)	9941,45	0,88	0,90 (IID)	32,98	0,86 / 0,19
YEAR + SURV + s(DEPTH)	9939,77	0,90	0,90 (IID)	34,86	0,78
Без пространственно-временного эффекта (spatiotemporal = off)	10006,74	2,36	—	191,07	0,31 / -0,26

Примечание: * – параметр пространственной корреляции, который показывает, на каком расстоянии (км) наблюдения перестают существенно влиять друг на друга.

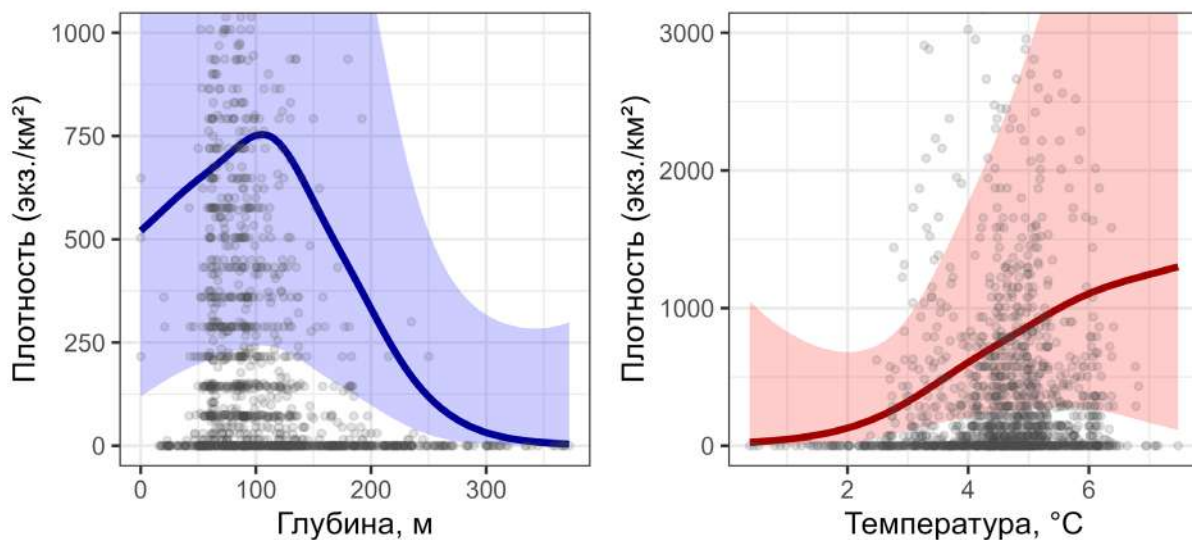


Рис. 3. Фактическое (серые точки) и моделируемое (линии) зависимость плотности (экз./км²) распределения промыслового запаса камчатского краба от глубины и температуры, рассчитанные в sdmTMB модели на данных, собранных в 2019–2024 гг. на юге Баренцева моря в ходе специализированной и экосистемной съёмок.

нейшего исследования с увеличенным объёмом данных. Полученные результаты подчеркивают критическую важность стандартизации методов научно-исследовательских съёмок для минимизации систематических ошибок в оценках запасов.

Пространственная структура характеризовалась коротким диапазоном корреляции (Matern range = 32,5 км) и умеренной вариацией (SD = 0,84), что отражает локальный характер распределения ресурса. Малая величина пространственной корреляции (Matern range) указывает на локальные кластеры типичные для прибрежных зон, где условия (глубина, температура) резко меняются на коротких дистанциях (рис. 4.). В тоже время обращает на себя внимание разнородность распределения промысловых особей камчатского краба в районе проведения специализированной съёмки (высокие плотности) и за её пределами (низкие плотности), т.е. в районах проведения экосистемной съёмки.

Полученные данные демонстрируют выраженную пространственную неоднородность распределения промысловых самцов, формирующую мозаичную картину плот-

ности в пределах акватории специализированной съёмки (Баканев, Стеско, 2024). Для периферийных участков исследуемого района было характерно сочетание участков с нулевыми уловами (составлявших от 5 до 25% от общего числа станций) и зон с повышенной концентрацией особей. Локализация участков максимальной плотности варьировала по годам, однако наиболее значимые уловы промысловых самцов регулярно регистрировались на глубинах 60–80 м в центральном и восточном секторах акватории. Комплексный анализ данных съёмок различных типов выявил, что за границами специализированного мониторинга доля пустых тралений возрастает до 62–72%, при этом встречи краба учащаются в прибрежной зоне и на акваториях, смежных с районом специализированных исследований. Рисунок 5 демонстрирует динамику индекса промыслового запаса камчатского краба в Баренцевом море за период 2019–2024 гг., рассчитанного по данным специализированной, экосистемной и комбинированной съёмок. Анализ временных рядов выявляет выраженные тенденции снижения плотности популяции, особенно заметные в

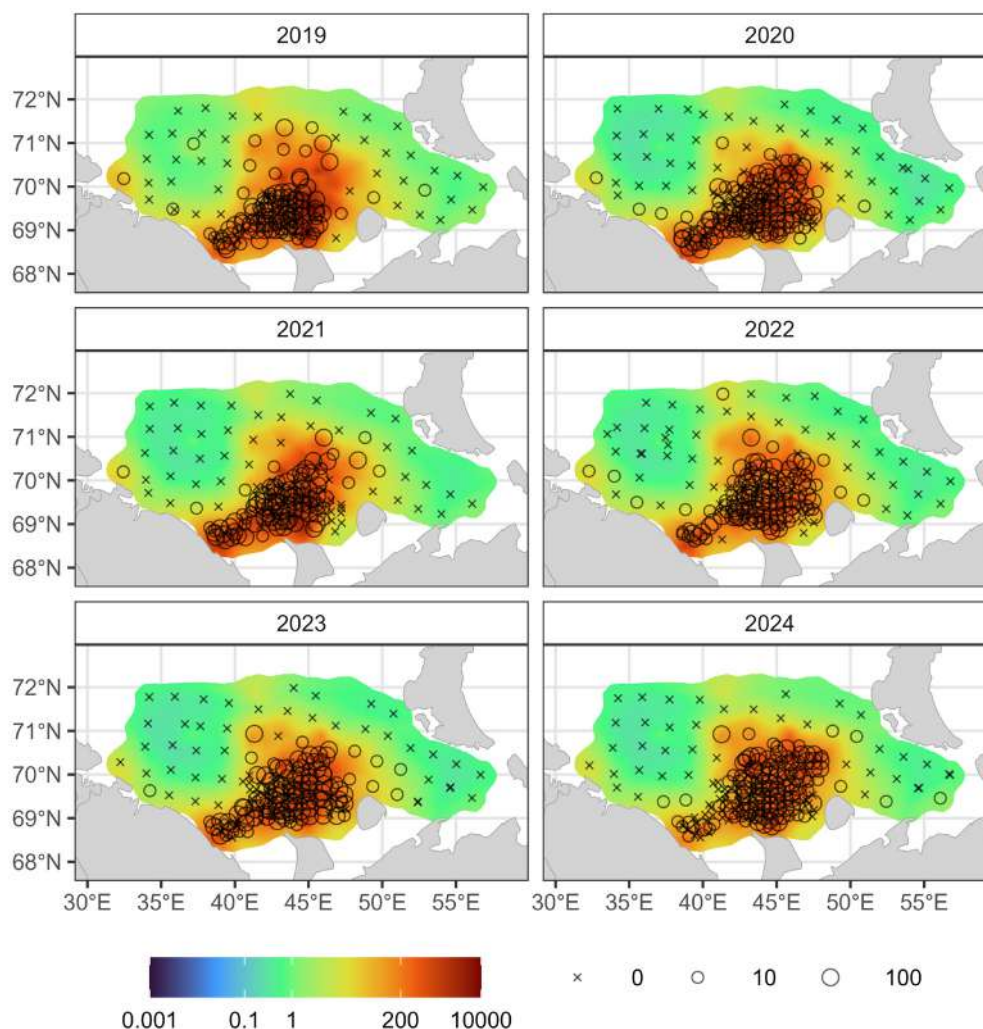


Рис. 4. Данные по уловам промысловых самцов камчатского краба (чёрные круги, экз./траление), полученные в ходе специализированных и экосистемных съёмок, и смоделированное с применением пакета sdmTMB распределение плотности (диапазон, экз./км²) в южной части Баренцева моря за период с 2019 по 2024 гг.

2022 г., что должно противоречить гипотезе о расширении ареала вида при одновременном сокращении концентрации в традиционных районах промысла (Баканев, Стесько, 2024), так как экосистемная съёмка охватила существенно большую акваторию, превышающую ареал камчатского краба на севере и северо-востоке.

Специализированная съёмка, охватывающая ограниченную акваторию с высокой плотностью краба, показывает устойчивое снижение индекса с 54,6 млн экз. в 2019 г. до 20,9 млн экз. в 2024 г., с резким падением в 2022 г. (23,1 млн экз.). При этом межгодовые

колебания, такие как рост на 13,9% в 2022–2023 гг., могут быть связаны с изменением пространственного распределения популяции или методологическими особенностями съёмок. Экосистемная съёмка, охватывающая более широкую акваторию, демонстрирует значительно более низкие оценки, что объясняется меньшей чувствительностью метода к локальным скоплениям краба. В 2020 г. индекс составил 7,3 млн экз., а к 2024 г. снизился до 5,5 млн экз., что указывает на уменьшение плотности в прибрежных зонах.

Комбинированный подход, объединяющий данные двух методов, подтверждает

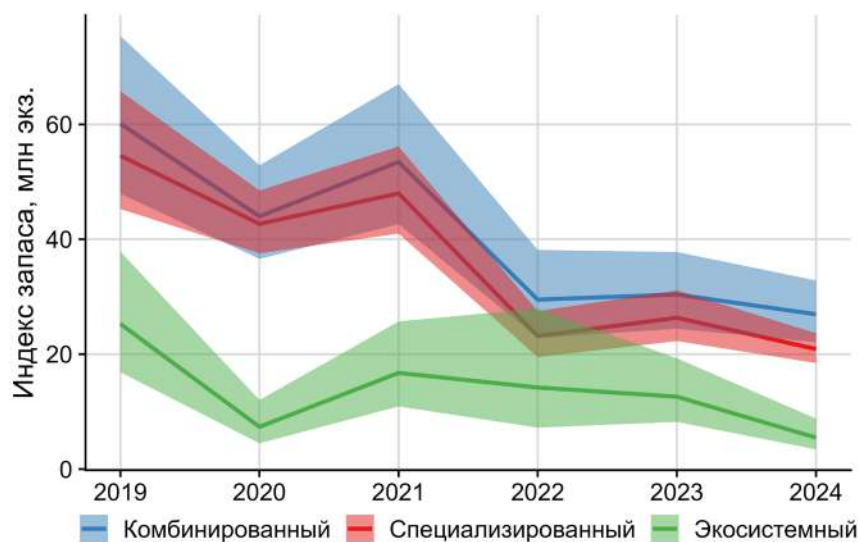


Рис. 5. Динамика индекса (млн экз.) промыслового запаса камчатского краба на юге Баренцева моря в 2019–2023 гг., рассчитанная по данным специализированной, экосистемной и объединённым съёмкам.

общую тенденцию снижения запаса, однако вариабельность оценок остаётся высокой, особенно в 2020–2022 гг., что связано с необходимостью экстраполяции данных на непокрытые участки акватории. Различия между результатами съёмок подчеркивают важность стандартизации методов сбора данных для минимизации систематических ошибок. Так, переход от специализированной к экосистемной съёмке сопровождается снижением плотности запаса на 89%, что требует учёта при межгодовых сравнениях. Кроме того, резкие изменения в 2022 г. могут быть обусловлены как климатическими факторами (например, потеплением Баренцева моря), так и увеличением антропогенного давления, что согласуется с прогнозами о смещении ареала краба в северо-восточные районы. Полученные данные также свидетельствуют о необходимости адаптации схем исследований к пространственно-временным изменениям популяции, особенно в условиях прогнозируемого потепления и усиления возможной конкуренции с крабом-стригуном опилио в северо-восточных районах.

Помимо расчёта индекса численности и биомассы гидробионтов SDM возможно

использовать для моделирования пригодности среды обитания (Habitat suitability modeling; HSM) – это статистический метод, используемый для прогнозирования, насколько благоприятной для данного вида является определённая среда обитания. Это делается путём идентификации факторов окружающей среды, которые вид выбирает или избегает, основываясь на их наличии на акватории. Модель рассчитывает индекс пригодности среды обитания, основанный на этих факторах (0 – среда не пригодна; 1 – среда полностью пригодна). Моделирование распространения инвазивного камчатского краба в Баренцевом море показало, что оптимальными районами для его существования при текущих океанографических условиях могут быть не только прибрежные районы юго-востока Баренцева моря, но и прибрежные районы о. Медвежий и арх. Шпицберген (рис. 6).

Экспансия камчатского краба может быть продолжена не только на северо-западном, но и на северо-восточном направлении, где формируются все более благоприятные условия для его обитания. Согласно результатам моделирования, прибрежные акватории южной части архипелага Новая Земля представляют

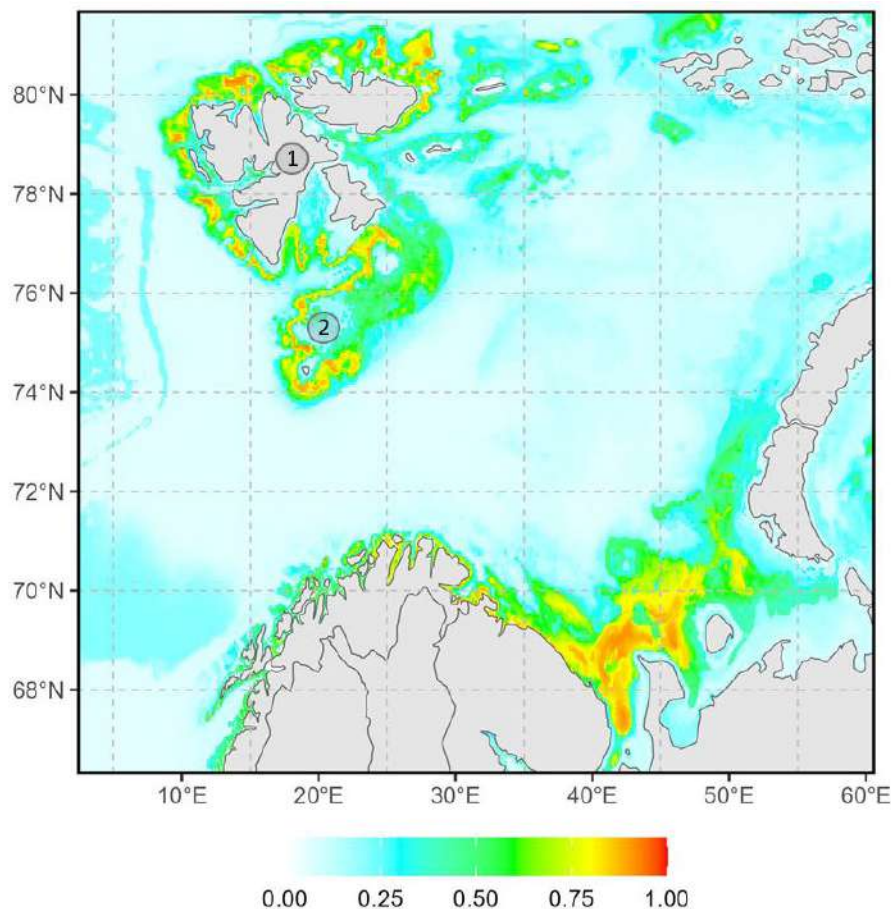


Рис. 6. Индекс пригодности среды для камчатского краба в Баренцевом море и прилегающих водах, выполненный на основе моделирования распределения видов (1 – арх. Шпицберген, 2 – о. Медвежий).

собой перспективный район для дальнейшего расселения камчатского краба. Эта тенденция объясняется тем, что данный вид, будучи относительно холодноводным, в условиях прогрессирующего потепления смещает свой ареал в северо-восточном направлении – к акваториям с более низкими температурами, включая прибрежные воды о. Колгуев и южной части архипелага Новая Земля. Прогнозное моделирование для сценария SSP5-8.5 (интенсивные выбросы парниковых газов) свидетельствует, что к концу XXI в. именно эти районы, наряду с традиционными участками у восточного побережья Мурмана, станут ключевыми зонами обитания вида (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённой работы разработан метод пространственно-временной

стандартизации оценки запаса камчатского краба в Баренцевом море, основанный на применении обобщённых аддитивных смешанных моделей (GAMM) с использованием пакета sdmTMB. Показано, что учёт пространственно-временной автокорреляции наблюдений позволяет существенно повысить достоверность получаемых оценок, минимизируя систематические погрешности, обусловленные различиями в методиках проведения съёмки и неоднородностью пространственного распределения вида. Модели, включающие пространственно-временные случайные эффекты, продемонстрировали наилучшее соответствие данным ($AIC = 9936,47$), подтвердив важность стандартизации исследовательских протоколов для сохранения преемственности временных рядов.

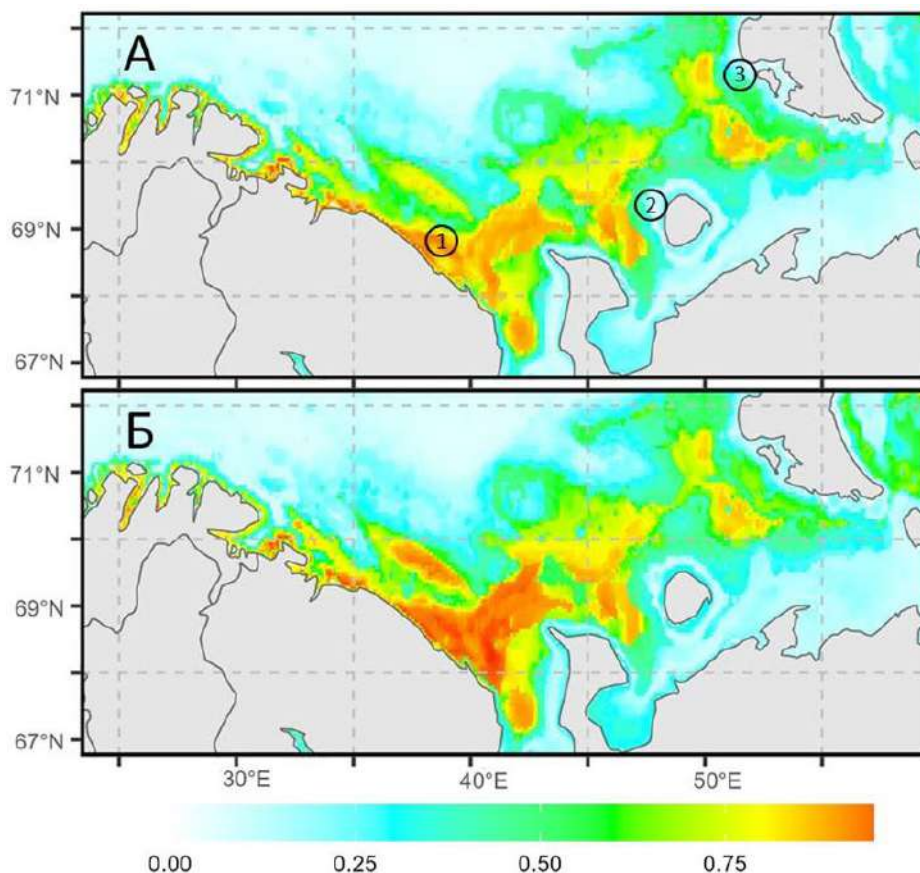


Рис. 7. Прогноз вероятности встречаемости камчатского краба в Баренцевом море и прилегающих водах в 2050–2060 гг. (А), 2090–2100 гг. (Б) выполненная на основе моделирования распределения видов в рамках социально-экономического сценария SSP5-8.5 (1 – побережье Восточного Мурмана, 2 – о. Колгуев, 3 – арх. Новая Земля).

Анализ влияния абиотических факторов выявил ключевые драйверы распределения промыслового запаса: придонная температура (5–7°C), глубина (25–150 м) и удалённость от берега (0–150 км). При этом коллинеарность между переменными, такими как глубина и температура ($r = 0,65$), подчёркивает необходимость дальнейших исследований для разделения их индивидуальных эффектов. Переход от специализированных к экосистемным съёмкам ассоциировался со снижением оценок плотности на 89%, что указывает на значимость выбора типа съёмки при интерпретации динамики популяций.

Прогнозирование в рамках климатического сценария SSP5-8.5 показало, что к концу XXI в. ареал камчатского краба сместится в северо-восточном направлении, охватывая

прибрежные районы архипелага Новая Земля и о. Колгуев. Это создаст новые экологические ниши, но также возможно усилит конкуренцию с другими видами ракообразных и изменит структуру бентосных сообществ. Полученные результаты подчеркивают двойственное влияние потепления: с одной стороны, расширение подходящих температурных условий, с другой – риски, связанные с перестройкой биотических взаимодействий.

Предлагаемый метод обладает значительным потенциалом для адаптации к оценке запасов других промысловых видов в различных регионах, где климатические изменения и антропогенное воздействие приводят к нарушению стационарности условий среды. Дальнейшие исследования должны быть направлены на учёт биотических взаимодействий,

таких как конкуренция и хищничество, а также на разработку динамических моделей, интегрирующих прогнозы изменения океанографических параметров с социально-экономическими сценариями. Это позволит не только улучшить управление ресурсами, но и прогнозировать экологические последствия климатических трансформаций для морских экосистем Арктики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баканев, С.В., Стесько А.В. Пространственно-временная стандартизация индекса запаса при выполнении исследовательских съёмок (на примере Камчатского краба в Баренцевом море) // *Вопр. рыболовства*. 2024. Т. 25. № 3. С. 181–196.

Изучение экосистем рыбохозяйственных водоёмов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Выпуск 1. Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в морях Европейского севера и Северной Атлантики. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во ВНИРО, 2004. 300 с.

Иоганзен Б.Г., Файзова Л.В. Об определении показателей встречаемости, обилия, биомассы и их соотношения у некоторых гидробионтов // *Элементы водных экосистем*. М.: Наука, 1978. С. 215–225.

Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: Типография АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.

Кулик В.В., Савин А.Б., Мальцев И.В. и др. Индекс биомассы трески в Западно-Беринговоморской зоне с учётом придонной температуры с 1977 по 2024 гг. // *Современные методы оценки и рационального использования водных биологических ресурсов: Материалы II Международной научно-практической конференции*, Москва, 18–22 ноября 2024 года. Москва: ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», 2025. С. 95–98.

Масстицкий С.Э., Шитиков В.К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. 2014. Электронная книга, адрес доступа: <http://r-analytics.blogspot.com>

Шитиков В.К. Модели распределения видов // *Принципы экологии*. 2021. № 4. С. 98–100.

Allouche O., Tsoar A., Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS) // *J. Applied Ecology*. 2006. V. 43. P. 1223–1232.

Anderson S.C., Ward E.J. Black swans in space: modeling spatiotemporal processes with extremes // *Ecology*. 2019. V. 100: e02403.

Anderson S.C., Ward E.J., English P.A., Barnett L.A.K. sdmTMB: an R package for fast, flexible, and user-friendly generalized linear mixed effects models with spatial and spatiotemporal random fields. *bioRxiv* 2022.03.24.485545. 2022. 35 p.

Assis J., Tyberghein L., Bosch S. et al. Bio-ORACLE v3.0: Expanding marine data layers for biogeographical modelling // *Global Ecology and Biogeography*. 2024. V. 33(4). P. 123–135.

Breheny P., Burchett W. Visualization of Regression Models Using visreg // *The R Journal*. 2017. V. 9/2. P. 56–71.

Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development*. 2016. V. 9. P. 1937–1958.

Fielding A.H., Bell J.F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models // *Environmental Conservation*. 1997. V. 24. № 1. P. 38–49.

Fisher R.A. The design of experiments. London: Oliver and Boyd, 1935. 252 p.

Frame B., Lawrence J., Ausseil A.G., Reisinger A., Daigneault A. Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios // *Climate Risk Management*, 2018. V. 21. P. 39–51.

Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. Habitat Suitability and Distribution Models. With Applications in R. Cambridge University Press, 2017. 462 p.

Hosmer D.W., Lemeshow S. Applied logistic regression. 2nd ed. Wiley, 2000. 397 p.

Mielke P.W., Berry K.J. Permutation Methods: A Distance Function Approach. Springer Series in Statistics. New York: Springer, 2001. 446 p.

Notz D. Arctic Sea Ice in CMIP6 // Geophysical Research Letters, 2020. V. 47. 11 p.

Pearson R.G. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners // American Museum of Natural History. Lessons in Conservation, 2007. V. 3. P. 54–89.

Shono H. Application of the Tweedie distribution to zero-catch data in CPUE analysis // Fisheries Research, 2008. V. 93. P. 154–162.

Shelton A.O., Thorson J.T., Ward E.J., Feist B.E. Spatial semiparametric models improve estimates of species abundance and distribution// Can. J. Fish. Aquat. Sci., 2014. V. 71. № 11. P. 1655–1666.

Thuiller W. BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change // Global Change Biology, 2003. V. 9. P. 1353–1362.

Tweedie M.C. An index which distinguishes between some important exponential families. In: Statistics: Applications and New Directions. Proc. Indian Statistical Institute Golden Jubilee International Conference. 1984. P. 579–604.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF FISHERY RESEARCH

SPATIOTEMPORAL ANALYSIS OF RED KING CRAB STOCK DYNAMICS IN THE BARENTS SEA USING SDM METHODS

© 2025 y. S.V. Bakanev

*Polar branch of the State Scientific Center of the «VNIRO»,
Russia, Murmansk, 183038*

The article presents a method for spatiotemporal standardization of stock assessment for the Kamchatka crab (*Paralithodes camtschaticus*) in the Barents Sea, based on Generalized Additive Mixed Models (GAMM) using the sdmTMB library in the R environment. Analysis of data from specialized and ecosystem surveys (2019–2024) identified key drivers of species distribution: bottom temperature (5–7°C), depth (25–150 m), and distance from the shore (0–150 km). It was found that switching to ecosystem surveys reduces density estimates by 89%, emphasizing the need for methodological standardization. Projections under the SSP5-8.5 climate scenario revealed a northeastward shift in the crab's range by 2100, including coastal zones of the Novaya Zemlya archipelago. The results demonstrate that incorporating spatiotemporal autocorrelation and ensemble modeling enhances estimation accuracy, providing a foundation for adaptive resource management under climate instability.

Keywords: red king crab, Barents Sea, spatiotemporal modeling, GAMM, fishery stock assessment, climate scenarios, abiotic factors, ensemble forecasting, SDM, ecological niche.