

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ
ИНДЕКСА ЗАПАСА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СЪЁМОК (НА ПРИМЕРЕ
КАМЧАТСКОГО КРАБА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ)**

© 2024 г. С.В. Баканев (spin: 9140-2907), А.В. Стесько (spin: 9681-1670)

*Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии, Россия, Мурманск, 183038
E-mail: bakanev@pinro.vniro.ru*

Поступила в редакцию 21.05.2024 г.

Представлены результаты пространственно-временной стандартизации индекса численности промыслового запаса камчатского краба в ИЭЗ России Баренцева моря с помощью обобщенной аддитивной модели со смешанными эффектами (ГАММ), реализованной в библиотеке sdmTMB статистической среды R. Пространственно-временной подход к моделированию распределения вида (SDM) в рамках ГАММ позволяет учитывать различные факторы среды и орудия лова, тем самым повышая точность оценки особенно на акваториях, где наблюдался недостаток данных. При этом моделируемая плотность запаса в районах, где наблюдения отсутствовали, учитывает пространственную и временную автокорреляцию между тралениями.

Ключевые слова: камчатский краб, Баренцево море, оценка запаса, инструментальная съёмка.

ВВЕДЕНИЕ

Инструментальные съёмки являются одним из основных методов учёта промысловых гидробионтов, которые используются для оценки состояния запасов и принятия решений по их управлению (Методическое..., 2006; Gunderson, 1993; Chen et al., 2003; DeFlippo et al., 2023). Обычно предполагается, что индексы численности или биомассы, полученные на основе данных съёмок, пропорциональны истинной численности или биомассе исследуемых запасов, и эта взаимосвязь выражается через параметр улавливаемости в моделях оценки (Бабаян, 2000; Quinn, Deriso, 1999). Зависимость между индексом съёмки и величиной промысловой популяции в большинстве случаев предполагается постоянной, нарушение которой может привести к неверным оценкам динамики запаса (Pope, Shepherd, 1985; Wilberg et al., 2009; Thorson et al., 2013; Kotwicki et al., 2014). Следовательно,

изменения в методиках проведения съёмок, которые могут повлиять на качество получаемых первичных данных, способны нарушить стационарность этой зависимости и исказить истинные тенденции в запасах, если их не учитывать (Godo, 1994; Kimura, Somerton, 2006; Cadigan et al., 2022).

Таким образом, строгое соблюдение методик и сохранение непрерывности временных рядов наблюдений являются важнейшими принципами выполнения такого рода исследований и необходимыми условиями получения качественных данных (Методическое..., 2006).

На практике, несмотря на крайнюю необходимость в постоянстве получения стандартизированных временных рядов, могут возникнуть обстоятельства, когда изменения неизбежны или полезны. Например, участки исторически обследованных акваторий могут стать временно недоступными по причине введения ограничений на плавание судов

или использование орудий лова, связанных с касанием дна. Аналогичным образом, опасные погодные условия, технические неполадки, нехватка персонала или запланированных денежных средств, а также пандемии, международные конфликты и иные обстоятельства могут нарушить способность научных организаций проводить исследования в рамках устоявшихся методик (ICES, 2020; Santora et al., 2021; ICES, 2023). В тоже время, некоторые конструктивные изменения исследований могут дать преимущества, такие как модернизация орудий лова или повышение эффективности схемы постановки станций (Brown et al., 2007; Oyafuso et al., 2021; Oyafuso et al., 2022). Более того, морские экосистемы динамичны, и может потребоваться обновление планов исследований для адаптации к меняющемуся распределению исследуемого гидробионта на традиционных акваториях съёмки или, к примеру, расширению его ареала (Dulvy et al., 2008; Pinsky, Mantua, 2014; Maureaud et al., 2021; DeFilippo et al., 2023).

Например, при проведении траловой съёмки запасов камчатского краба в южной части Баренцева моря в 2017–2023 гг. ежегодная площадь акватории этой съёмки существенно варьировала, затрудняя выполнение сравнительного анализа межгодовых изменений динамики запаса этого гидробионта. При анализе динамики и расчёта плотности распределения, а также индексов запаса ракообразного применялась стандартная площадь, на которой исследования выполнялись наиболее часто, при этом в те годы, когда площадь фактической акватории работ сокращалась, отсутствующие участки дополнялись за счёт применения методов экстраполяции, а в отдельных случаях путём применения средних величин, полученных по результатам прошлых лет. Прочие участки, не попадающие под упомянутую выше стандартную площадь, использовались для получения данных о состоянии индекса запаса в текущий год, для сравнения с похожими по охвату акватории годами исследований и для уточнения харак-

тера распределения крабов различных категорий, однако в качестве надежного трендового показателя они были неприменимы.

Таким образом, стандартизация площади съёмки, при которой утрачивалась часть информации, приводила к неэффективному использованию полученных данных.

Кроме того, в 2022–2023 гг. произошло существенное снижение индекса биомассы на исследованной акватории Баренцева моря. Было выдвинуто несколько гипотез о причинах таких изменений, одна из которых предполагала расширение ареала промыслового запаса с одновременным снижением плотности распределения в эти годы. В связи с этим возник вопрос о расширении акватории съёмки в рамках сохранения текущей продолжительности рейса, но без существенной потери точности выполняемой оценки.

В настоящей работе предлагается решение вышеуказанных методических проблем посредством пространственно-временного моделирования плотности распределения вида с использованием единой площади исследовательской съёмки без сокращения объёма данных. Для этого использовалась обобщенная аддитивная модель со смешанными эффектами (GAMM), реализованная в библиотеке *sdmTMB*, которая начала широко использоваться для расчётов индексов запасов и решения указанных выше проблем в международной практике (Barnett et al., 2021; Anderson et al., 2022; Thompson et al., 2023; Yalcin et al., 2023).

Одной из задач исследования являлось определение оптимального количества станций в ходе выполнения исследовательской съёмки, при которой мера изменчивости получаемого индекса промыслового запаса оказалась бы приемлемой. Показателем вариативности моделируемого индекса является коэффициент вариации (CV) его медианного значения. В математической статистике изменчивость признака принято считать незначительной, если коэффициент вариации не превышает 10%, средней, если CV

выше 10%, но менее 20%, и значительной, если коэффициент вариации более 20% (Доспехов, 1985). В рыбохозяйственных исследованиях, как правило, показатель индекса численности или биомассы запаса, для которой CV равен или менее 20% (в некоторых случаях менее 30–35%), считается надежным (Francis et al., 2001; Kotwicki et al., 2018; DeFilippo et al., 2023; Fall et al., 2023). При этом для увеличения точности при CV превышающим 20% рекомендуется увеличивать количество траловых станций при выполнении исследовательской съёмки в пределах одной и той же акватории. В настоящей статье рассмотрена взаимосвязь между объёмом набора данных (количества станций в съёмках) и точностью получаемого индекса промыслового запаса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для настоящей работы послужили данные траловой съёмки, полученные в ходе специализированных исследований камчатского краба на южной части шельфа Баренцева моря в августе–сентябре 2017–2023 гг. (рис. 1). Станции выполняли при помощи донного трала (чертеж 22М) с ячеей в кутке равной 45 мм, в рубашке – 16 мм. Использовали грунтроп типа «Rockhopper» длиной 12 м, диаметр дисков – 400 мм. Длительность тралений составляла 15 мин., средняя скорость – 2,6 узла. Среднее количество тралений за исследовательскую съёмку составило 117, а площадь акватории 37,5 тыс. км² (табл. 1).

Полевые исследования проводили по стандартным методикам (Изучение экосистем..., 2004). У выловленных крабов измеряли ширину карапакса (далее – ШК, мм), определяли пол, межлиночную категорию покровов самцов и стадию зрелости икры у самок. К промысловым самцам, которых учитывали при расчёте индекса промыслового запаса, относились особи с ШК 150 и более мм. Общее количество проанализированных крабов составило – 96249 экз., из них промысловых – 44918. Океанографические наблю-

дения в ходе съёмок выполнялись с помощью зондирующего устройства SBE-19 Plus фирмы SeaBird Electronics. Океанографические условия изучали в толще воды от поверхности до дна. Минимальная глубина погружения зонда составляла 41 м, максимальная – 231 м. В процессе исследований океанографические станции сопровождали постановку каждой траловой станции.

Расчёты индекса промыслового запаса камчатского краба выполняли в ГИС «Картмастер 4.1» с использованием метода 2D-сплайна без учёта влияния глубины и коэффициента уловистости трала (Бизиков и др., 2006). Кроме того, 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, Ward, 2019).

В ходе анализа, кроме категориального фактора года, в модель индекса плотности включались следующие переменные, которые потенциально могли оказывать влияние на плотность распределения промыслового запаса в период проведения съёмки: придонная температура, солёность, глубина, удалённость от берега. Процедура выбора наилучшей модели индекса плотности построена на серии экспериментов, которые сводились к

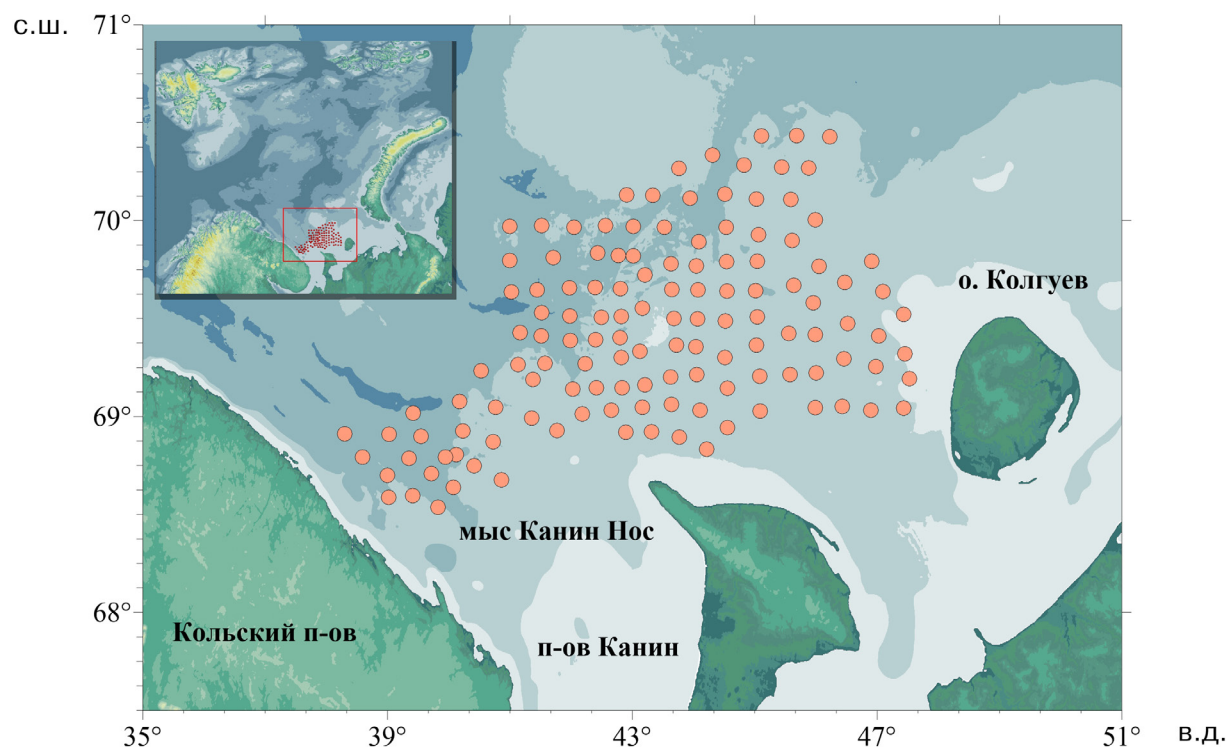


Рис. 1. Положение траловых станций в ходе научно-исследовательских съёмок камчатского краба в Баренцевом море в 2017–2023 гг. (на примере 2023 г.).

Таблица 1 Основные показатели траловых съёмок и уловов промысловых самцов камчатского краба в Баренцевом море в 2017–2023 гг.

Год	Площадь, тыс. км ²	Кол-во тралений	Доля тралений без улова, %	Улов, экз. на 1 час траление			Модельные расчёты по ГИС «Картмастер»	
				Сред- ний	Медиана	Макси- мальный	Средняя плотность, экз./км ²	Индекс запаса, млн. экз.
2017	19,5	107	25	61	12	1520	1065	21,6
2018	36,8	130	8	106	42	4028	1875	46,9
2019	29,0	98	5	88	28	1476	1589	50,9
2020	44,8	137	11	51	20	952	888	57,6
2021	40,5	105	15	54	28	908	970	32,1
2022	50,2	114	10	24	16	196	440	18,2
2023	42,0	131	21	25	16	264	450	16,9
Среднее	37,5	117	14	58	23	1335	1040	34,9

последовательному тестированию вариантов модели, полученных путём различных комбинаций всех предварительно отобранных наборов независимых параметров. Для итоговых расчётов выбирали модель с наименьшим значением информационного критерия Акаике (AIC). Для сравнительного анализа влияния независимых переменных в качестве зависимой переменной в модели кроме индекса плотности промыслового запаса применялись индексы плотности распределения различных размерно-половых категорий крабов: непромысловых самцов (с ШК менее 150 мм), самок с наружной икрой, самок без икры, а также самцов и самок без учёта как размера, так и наличия икры.

В качестве критерия вариативности индекса запаса рассматривали коэффициент вариации (CV), который рассчитывался при различных наборах траловых станций. При этом в первоначальном наборе станций случайным образом удалялась часть станций с сохранением 25, 50, 75, 100 % от первоначального набора. После применения бутстреп процедуры, настроенной на 1000 итераций, рассчитывался средний CV для медианного значения индекса промыслового запаса для каждого года. При этом вариабельность индекса моделируемой съёмки считалась приемлемой при средней величине CV равной 20% или менее.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение промысловых самцов камчатского краба по данным съёмок 2017–2023 гг. характеризовались высокой пространственной и временной изменчивостью. Межгодовые колебания средних, медианных и максимальных уловов значительно варьировали, достигая максимальных значений в начальный период (2018–2020 гг.) и минимальных – в последние годы исследований (2022–2023 гг.) (табл. 1). Максимальные уловы промысловых самцов нередко превышали 250 экз. на 1 час траления в 2017–2021 гг., в некоторых случаях, достигая 2000–4000 экз. (рис. 2). Такие

скопления крабов имели точечный характер, в порейсовой отчётности и литературе именуемые массовыми, как правило, облавливались на акватории Канино-Колгуевского мелководья, куда краб сместился относительно недавно – в начале 2010 гг. (Стесько, Жак, 2021). В 2022–2023 гг. максимальные уловы значительно снизились (до 500 экз. на один час траления), при этом средние и медианные уловы в эти годы существенно уменьшились по сравнению с предыдущими годами (2018–2021 гг.).

Динамика уловов не могла не повлиять на расчётные индексы запаса, которые выполнялись в ГИС «Картмастер 4.1» методом 2D сплайна.

Так, на расчётной площади 36,8 тыс. км², принятой по образцу 2018 г. за стандартную для снижения влияния межгодовых изменений акватории съёмки, индекс промысловой биомассы в 2022 г. упал в два раза. Предположения о значительном перераспределении запаса или иных особенностях работ 2022 г., которые могли бы обусловить такое резкое падение, данными 2023 г. не подтвердились, поскольку уловы краба и, соответственно, индексы, оказались на примерно том же уровне.

Пространственная изменчивость характеризовалась относительно высокой мозаичностью плотности распределения промысловых самцов (рис. 3). Чередование акваторий с нулевыми уловами, доля которых варьировала от 5–25% от всех траловых станций (табл. 1), с участками высокой плотности распределения уловов были характерны для приграничных зон съёмки. Расположение участков с максимальной плотностью распределения крабов изменялось год от года, однако в основном наибольшие уловы промысловых самцов были получены на глубинах 60–80 м в центральной и восточной частях акватории съёмки.

Площадь акватории съёмки значительно варьировала год от года, покрывая в некоторые годы акваторию в 2,0–2,5 раза больше пер-

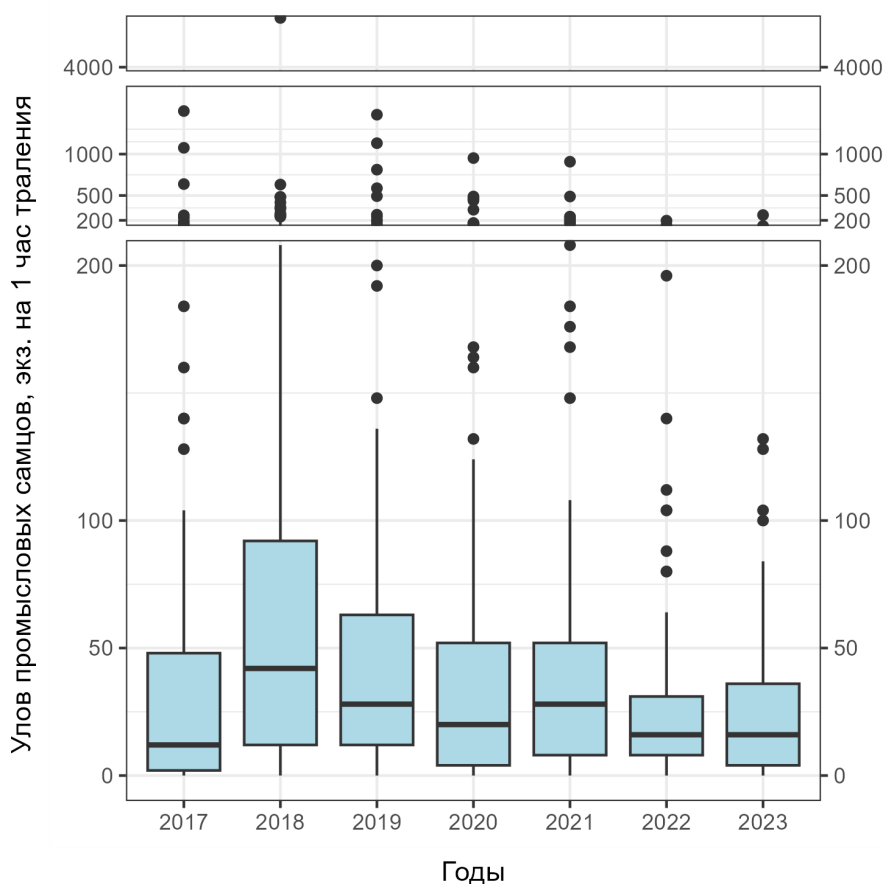


Рис. 2. Динамика уловов промысловых самцов камчатского краба (экз. на один час траления) в Баренцевом море по данным траловых съёмок 2017–2023 гг.

воначальной (табл. 1). Соответственно динамика индекса запаса зависела не только от межгодовой вариативности плотности распределения промыслового запаса, но и от изменения площади акватории съёмки. Если сравнить модельные значения средней плотности уловов и медианные значения индекса запаса камчатского краба, рассчитанные в программе ГИС «Картмастер 4.1», то в некоторые годы (2018–2020, 2022–2023 гг.) направления их трендов не совпадают. При этом максимальные значения этих параметров соответствуют разным годам: максимальная средняя плотность была отмечена в 2018 г., а максимальный индекс – в 2020 г. (рис. 4).

С целью получения сравнимого индекса запаса была предпринята попытка выполнить его оценку на обновленной стандартной площади с помощью ГИС «Картмастер 4.1», кото-

рая была оконтурена по границам съёмок 2020 г. и 2022–2023 гг., когда площадь покрытия была максимальной. При этом в районах, где траловые станции в съёмках 2017–2019 гг. отсутствовали, программа заполнила площадь нулевыми значениями (рис. 5). Основываясь на данных последующих лет (2020–2023 гг.) возможно предположить, что допущение о нулевых уловах в районах, где отсутствовали исследования в съёмках 2017–2019 гг., является маловероятным.

Более биологически адекватным способом восстановления плотности распределения запаса в районах, где наблюдения отсутствовали, может являться использование различных методов осреднения значения индекса за ряд лет, в которые существовали наблюдения в этих районах. Однако такое осреднение не учитывает пространственную изменчи-

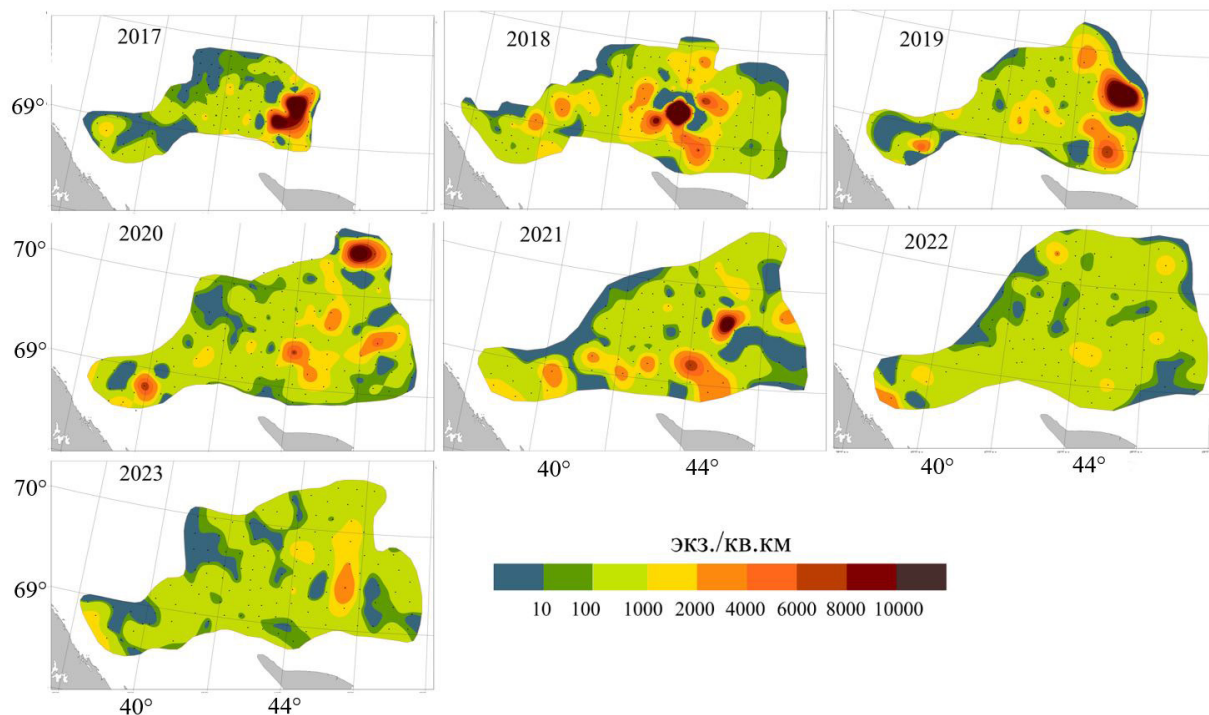


Рис. 3. Распределение промысловых самцов камчатского краба (экз./км²), рассчитанное с помощью ГИС «Картмастер 4.1» с индивидуальным оконтуриванием площади исследования по данным траловых съёмок на юге Баренцева моря в 2017–2023 гг.

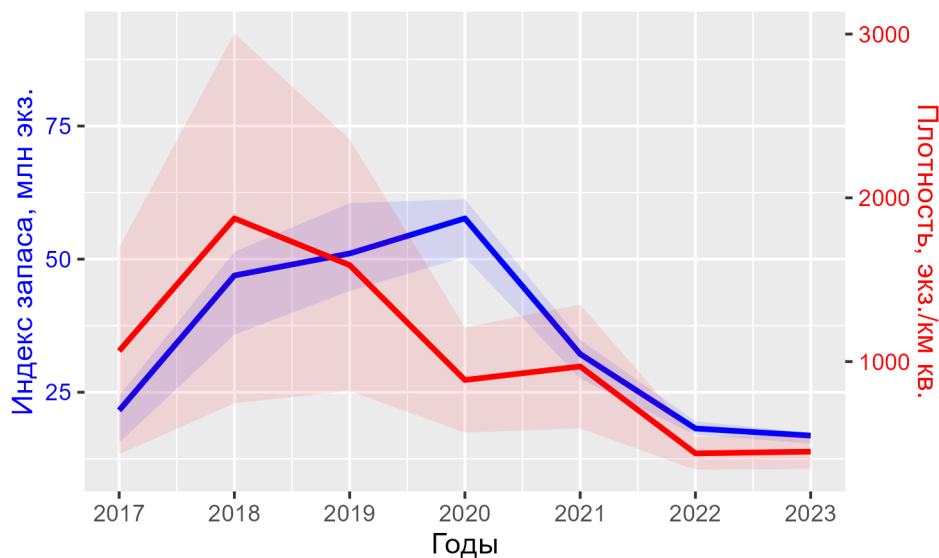


Рис. 4. Динамика индекса промыслового запаса (млн экз.), рассчитанный по ГИС «Картмастер 4.1» (синяя линия), и средней плотности распределения уловов (экз./км², красная линия) камчатского краба по данным съёмок 2017–2023 гг.

вость распределения плотности в районах, где исследования не проводились. Такая изменчивость может быть существенной, что стало заметно при расширении площади съёмки в

восточном и северо-восточном направлении с 2020 г. (рис. 5). В новых районах наблюдались как максимально плотные скопления (например, в северо-восточной части района съёмки

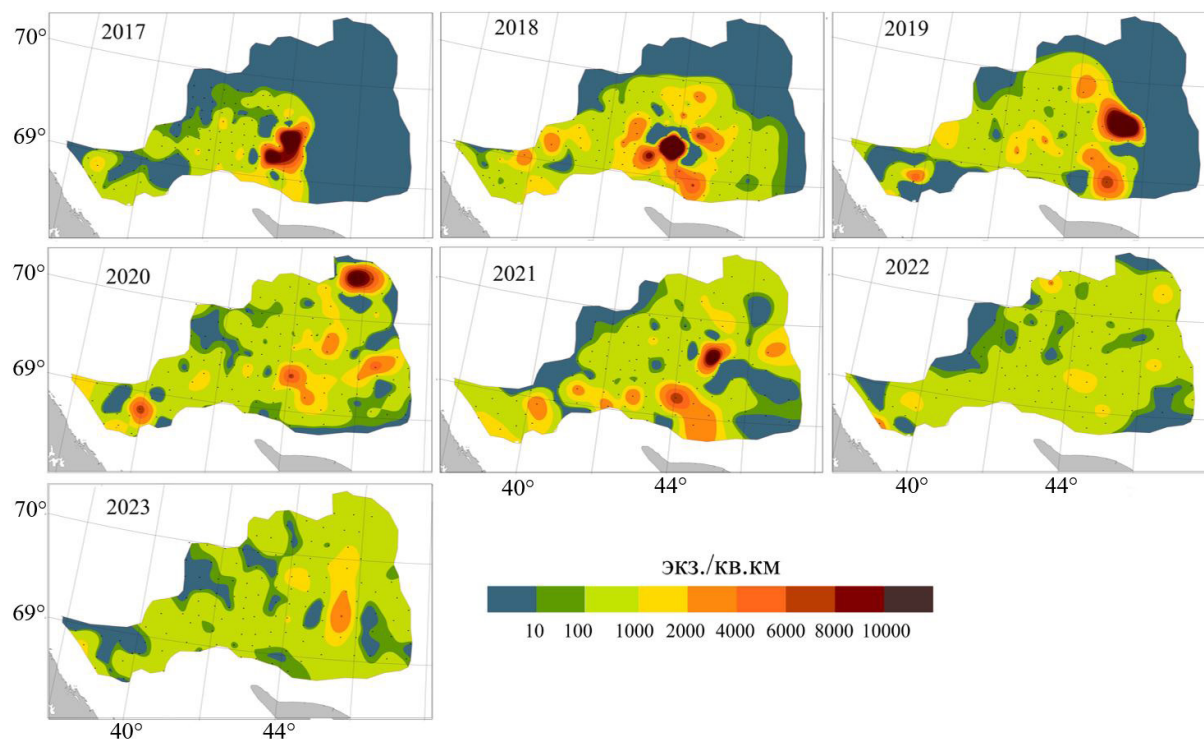


Рис. 5. Распределение промысловых самцов камчатского краба (экз./км²), рассчитанное с помощью ГИС «Картмастер 4.1» со стандартным оконтуриванием площади исследования по данным траловых съёмок на юге Баренцева моря в 2017–2023 гг.

в 2020 г.), так и почти полное отсутствие в уловах промысловых самцов (в юго-восточной части района съёмки в 2021 г.). С целью учёта такого рода пространственных различий была использована пространственно-временная обобщенная аддитивная модель, реализованная в библиотеке sdmTMB. Моделирование с использованием временной и пространственной автокорреляции значений плотности по данным траловых станций позволили восстановить эти плотности на участках, где отсутствовали наблюдения в 2017–2019 гг. (рис. 6).

Сравнительный анализ динамики индекса запаса при стандартизации площади в программе ГИС «Картмастер 4.1» и в sdmTMB показал, что тренды в целом были схожи, однако в некоторые годы (2019–2021 гг.) различались (рис. 7). Доверительный интервал для медианных значений индекса в 2017–2018 гг., рассчитанный в ГИС «Картмастер 4.1», оказался шире из-за того, что в неко-

торых районах в эти годы траления не производились. Стоит отметить, что стандартизация индекса по двум вышеуказанным методам позволила приблизить его динамику к динамике средней плотности распределения уловов (рис. 2). В то же время динамика индекса, рассчитанная по sdmTMB, лучше совпадает с прямыми наблюдениями в 2018–2021 гг.

При использовании различных наборов данных, в которых случайным образом последовательно сокращалось количество станций, точность рассчитанного на основе этих данных индекса закономерно снижалась. Наиболее широкий доверительный интервал был получен на минимальном наборе данных, равным 25% от полного набора. Последовательное увеличение количества станций на 25% определяло снижение ошибки, в среднем, на 25% (рис. 8). Стоит отметить что медианные оценки при различных наборах данных существенно не менялись, а их динамика оказалась практически идентичной.

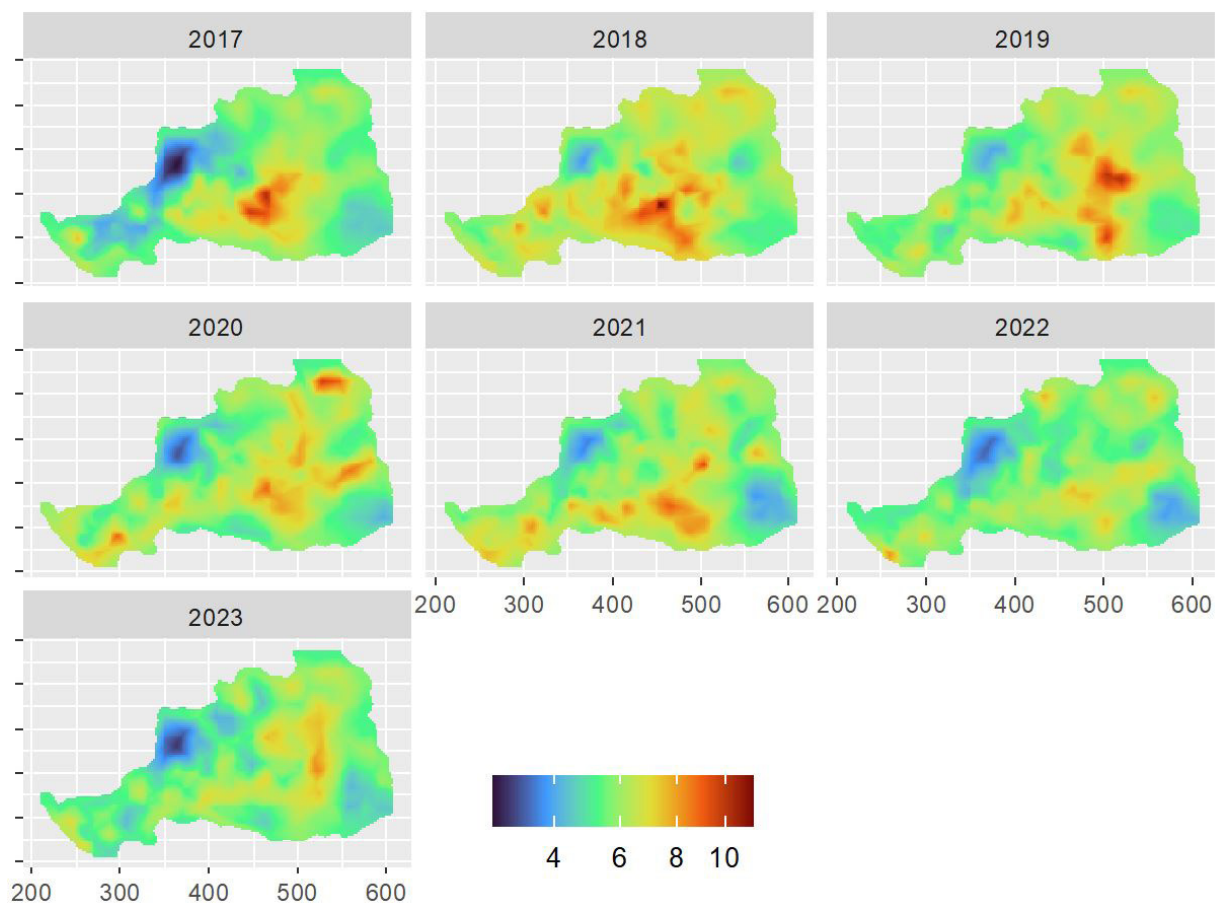


Рис. 6. Распределение промысловых самцов камчатского краба ($\log(\text{экз.}/\text{км}^2)$), рассчитанное с помощью библиотеки `sdmTMB` со стандартным оконтуриванием площади исследования по данным траловых съёмок на юге Баренцева моря в 2017–2023 гг.

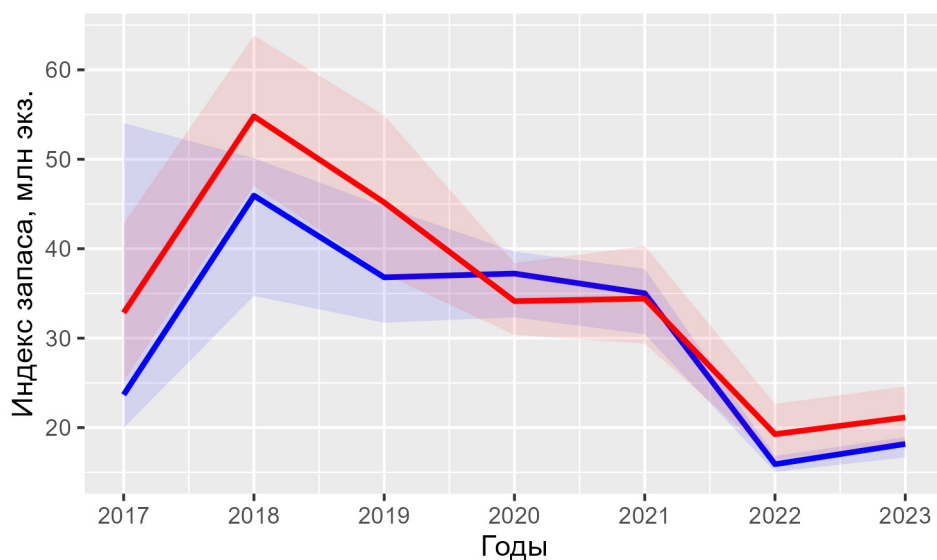


Рис. 7. Динамика стандартизованного по площади индекса промыслового запаса (млн экз.) камчатского краба, рассчитанная по данным специализированных съёмок в 2017–2023 гг. с использованием ГИС «Картмастер 4.1» (синяя линия) и в `sdmTMB` (красная линия).

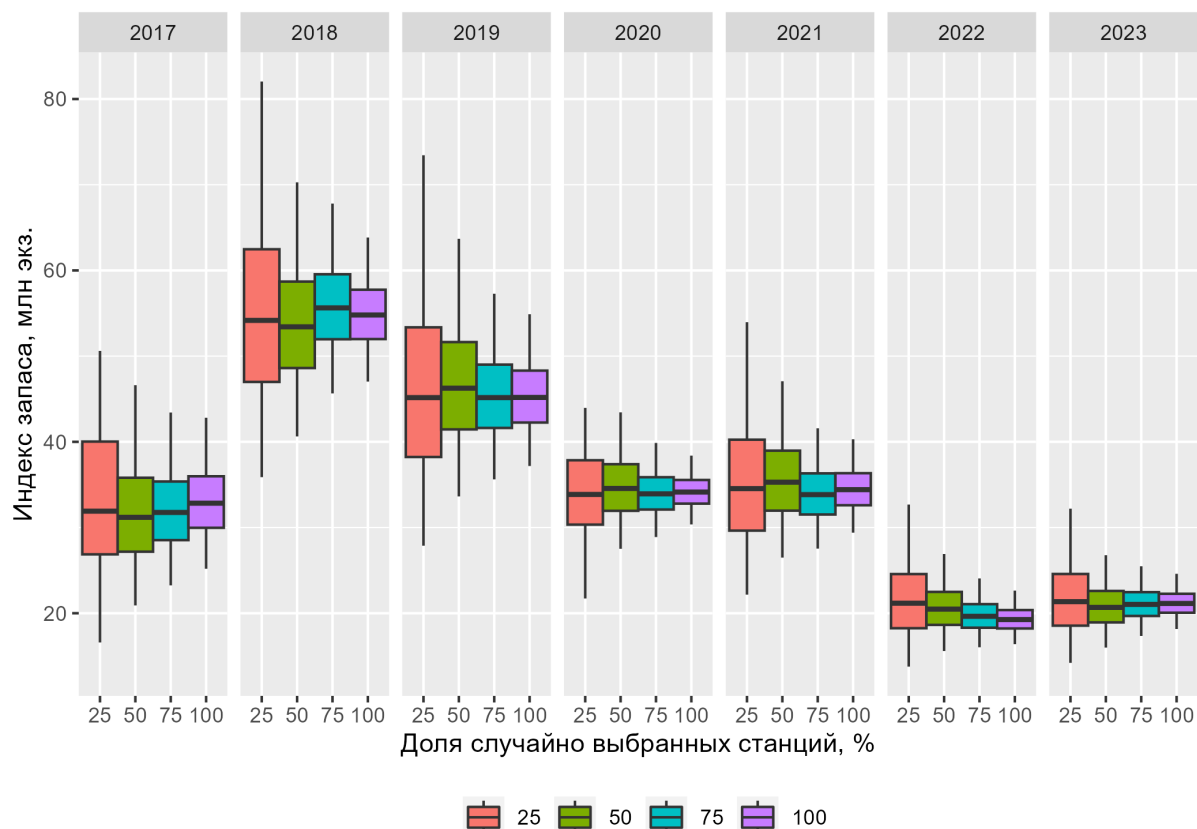


Рис. 8. Динамика индекса промыслового запаса (млн экз.) камчатского краба, рассчитанная с использованием в sdmTMB различных наборов данных специализированных съёмок в 2017–2023 гг.

Коэффициент вариации (CV) индекса промыслового запаса камчатского краба при полном наборе данных (100%) в разные годы варьировал в диапазоне 8–14%, что позволяет сделать вывод о низкой вариативности оценки индекса при существующем количестве траловых станций (табл. 2). Сокращение количества станций на 25 и 50% не приводит к существенному увеличению CV, который при этом не достигает допустимого приемлемого значения в 20%. Только при 25%-ой доле случайно выбранных станций средний CV за годы наблюдений превысил допустимый предел и составил 22%.

Таким образом, коэффициент вариации, который рассчитывался при различных наборах траловых станций, показал, что сокращение количества станций на 50% на исследуемой акватории не приведет к существенному снижению вариативности индекса запаса камчатского краба в Баренцевом море.

Включение в модель индекса плотности распределения промыслового запаса, помимо фактора года, еще и различных переменных окружающей среды (придонная температура, солёность, глубина, удалённость от берега) не оказало существенного влияния на точность подгонки модельных значений к фактическим данным. Критерий Акаике не снижался или снижался несущественно, что говорит об отсутствии связи индекса плотности промысловых самцов с исследуемыми факторами окружающей среды.

Известно, что крупные самцы камчатского краба более активны и подвержены существенным кормовым и нерестовым миграциям по сравнению с самками и непромысловой молодью (Виноградов, 1945; Левин, 2001; Матюшкин, 2003). По всей видимости, характер распределения крупных самцов в меньшей степени определяется динамическими (температура, солёность) и ста-

Таблица 2. Коэффициент вариации (CV) индекса промыслового запаса камчатского краба в Баренцевом море, рассчитанного с различной долей случайно выбранных станций в 2017–2023 гг.

Год/Доля случайно выбранных станций	25%	50%	75%	100%
2017	29	19	15	14
2018	20	15	9	8
2019	23	16	12	10
2020	19	12	8	6
2021	25	17	10	8
2022	20	14	10	8
2023	19	12	9	8
Средний CV	22	15	10	9

тическими (глубиной, удалённость от берега) условиями окружающей среды в период проведения съёмки на исследуемой акватории по сравнению, например, с характером распределения самок, которые предпочитают мелководные прибрежные районы. Это хорошо заметно при моделировании их распределения с включением в модель вышеупомянутых факторов среды. Полученные результаты могут быть интерпретированы в соответствии с представлениями о характере влияния факторов. На рисунке 9 заметно увеличение уловов самок с уменьшением расстояния от берега и глубиной, что объясняется менее выраженными кормовыми миграциями по сравнению с крупными самцами и предпочтением мелководных прибрежных акваторий. В то же время отмечается влияние придонной температуры и солёности на формирование скоплений. Наиболее высокие уловы самок в ИЭЗ России приурочены к более тёплым и менее распреснённым акваториям (рис. 9).

Указанные выше зависимости в целом соответствуют особенностям жизненного цикла самок камчатского краба, в том числе специфике нерестовых миграций и температурному предпочтению. Самки, в особенности

особи с наружной икрой, более теплолюбивы (Виноградов, 1945; 1968), чем самцы. Фактор солёности также играет существенную роль. Так, нижняя граница оптимальных значений солёности для развития личинок камчатского краба составляет 30‰, и, по всей вероятности, икраные самки не должны смещаться в сторону неблагоприятных для себя и потомства условий среды (Паршин-Чудин и др., 2014). Вместе с тем, влияние факторов температуры и солёности могут не совпадать в тех случаях, когда речь идёт о прибрежных акваториях, мелководных, хорошо прогретых, но, как правило, более распреснённых, чем мористые участки. В данном случае самки предпочитают солёности температурный фактор, что неоднократно показано результатами прибрежных исследований в Воронке Белого моря. Так, в ходе упомянутых выше экспедиционных работ наиболее крупные скопления самок были обнаружены к югу от п-ова Канин, в Воронке Белого моря, где солёность в целом по исследованной акватории была минимальной, за исключением экстремальных условий в Горле Белого моря, а температура – максимальной (Стесько и др., 2021a; Стесько и др., 2021b;

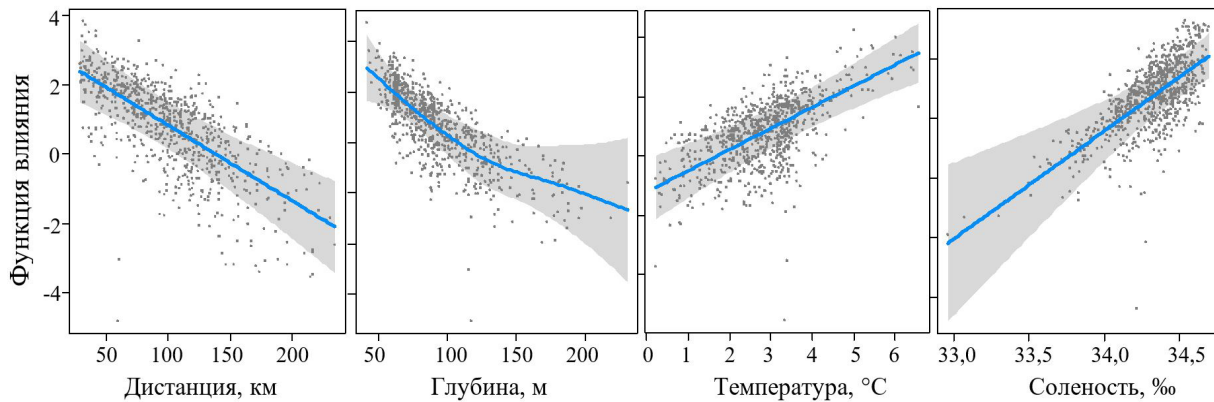


Рис. 9. Функция влияния переменных на величину улова (экз./траление) самок камчатского краба для обобщённой аддитивной модели смешанного эффекта (GAMM) по данным съёмок 2017–2023 гг.

Стедько, Буяновский, 2021). С учётом того, что в летний период в ИЭЗ России встречаемость самок существенно меньше, чем в прибрежных районах, можно предположить, что зависимость плотности их скопления от условий среды будет носить в существенной мере случайный характер. Следует указать, что по результатам анализа различных факторов на ловушечные уловы камчатского краба, значимой корреляции между глубиной и величиной ловушечных уловов не было выявлено для всех категорий крабов, за исключением уловов самок с наружной икрой (Стедько и др., 2021a). Колебания температуры и солёности в прибрежье куда более выражены, чем на мористых участках, что может объяснить более высокую зависимость крабов от этих факторов.

Тем не менее, включение в модель факторов среды, влияющих на распределение вида, может существенно уменьшить неопределённость в оценках при недостатке фактических наблюдений (при разреженной сетке станций) или при экстраполяции данных на акватории, где в те или иные годы наблюдения отсутствовали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование индекса плотности распределения камчатского краба с использованием временной и пространственной автокор-

реляции по данным исследовательских съёмок позволяет стандартизировать площадь акватории съёмки за весь период наблюдений для получения более корректной динамики запаса. При этом моделируемая плотность в районах, где наблюдения отсутствовали, учитывает пространственную и временную автокорреляцию между тралениями.

Пространственно-временной подход к моделированию распределения вида SDM в рамках GAMM позволяет учитывать различные факторы среды, тем самым повышая точность оценки особенно на акваториях, где наблюдался недостаток данных. Кроме того, метод позволяет учесть не только природные, но и производственные факторы, например, различные типы орудий лова, если «гибридная» исследовательская съёмка проводится как донным тралом, так и крабовыми ловушками. В модель можно включить статистические данные производительности лова (CPUE) в ходе его промысла, позволяя моделировать динамику запаса с использованием всего набора имеющейся информации как научной, так и промысловой.

Пространственно-временную стандартизацию индекса запаса следует рекомендовать для широкого внедрения в практику оценки состояния запаса при обосновании объёмов добычи. Использование данной процедуры может не только повысить

корректность оценки ОДУ при использовании аналитических подходов, но и усилит её репрезентативность в случае экспертной оценки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бабаян В.К. Предосторожный подход к оценке общего допустимого улова (ОДУ): анализ и рекомендации по применению. М.: Изд-во ВНИРО. 2000. 192 с.

Бизиков В.А., Гончаров С.М., Поляков А.В. Новая географическая информационная система «КартМастер» для обработки данных биоресурсных съёмок // Мат. VII Всерос. конф. по пром. беспозвоночным (памяти Б.Г. Иванова). Мурманск, 9–13 октября 2006 г. М.: Изд-во ВНИРО. 2006. С. 18–24.

Виноградов Л.Г. Годичный цикл жизни и миграции краба в северной части западнокамчатского шельфа // Изв. ТИНРО. 1945. Т. 19. С. 3–54

Виноградов Л.Г. Камчатское стадо крабов // Природа. 1968. № 7. С. 43–50.

Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат. 1985. 351 с.

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.

Левин В.С. Камчатский краб *Paralithodes camtschaticus* Биология, промысел, воспроизводство. СПб.: Ижица, 2001. 198 с.

Матюшкин В.Б. Сезонные миграции камчатского краба в Баренцевом море // Камчатский краб в Баренцевом море. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. С. 70–78.

Методическое пособие по проведению инструментальных съёмок запасов промыс-

ловых гидробионтов в районах исследований ПИНРО. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2006. 163 с.

Паршин-Чудин А.В., Борисов Р.Р., Ковачева Н.П. и др. Влияние солёности на выживаемость камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* (Tilesius, 1815) на ранних стадиях онтогенеза // Экология. 2014. № 2. С. 154–156.

Старилов Ю.В., Спиридонов В.А., Наумов А.Д., Зуев Ю.А. Первая находка и возможности формирования популяции камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* (Crustacea Decapoda Lithodidae) в Белом море // Российский журнал биологических инвазий. 2015. № 1. С. 79–95.

Стесько А.В., Буяновский А.И. Функциональная структура популяции камчатского краба // Камчатский краб в Баренцевом море. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: ФГБНУ «ВНИРО», 2021. С. 123–162.

Стесько А.В., Жак Ю.И. Распространение камчатского краба / Камчатский краб в Баренцевом море. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: ФГБНУ «ВНИРО». 2021. С. 18–22.

Стесько А.В., Сентябов Е.В., Соколов К.М. Изменчивость ловушечных уловов камчатского краба в прибрежной части Баренцева моря в 2008–2018 гг. // Тр. ВНИРО. 2021 а. Т. 183. С. 5–26.

Стесько А.В., Манушин И.Е., Соколов К.М. Перспективы дальнейшего распространения камчатского краба / Камчатский краб в Баренцевом море. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: ФГБНУ «ВНИРО», 2021 б. С. 163–172.

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. 2020. 35 p.

Barnett L.A., Ward E.J., Anderson S.C. Improving estimates of species distribution change by incorporating local trends // Ecography. 2021. V. 44. N. 3. P. 427–439.

- Brown R.W., Fogarty M., Legault C., et.al. Survey transition and calibration of bottom trawl surveys along the northeastern continental shelf of the United States // Int. Council Explor. Sea. CM200. Q: 20. 2007. 25 p.
- Cadigan N., Yin Y., Benoît H.P., Walsh S.J. A nonparametric-monotone regression model and robust estimation for paired-tow bottom-trawl survey comparative fishing data // Fisheries Res. 2022. V. 254. P. 236–249.
- Chen Y., Chen L., Stergiou K.I. Impacts of data quantity on fisheries stock assessment // Aquat. Sci. 2003. V. 65. № 1. P. 92–98.
- De Filippo L.B., Thorson J.T., O'Leary C.A., et al. Characterizing dominant patterns of spatiotemporal variation for a transboundary groundfish assemblage // Fisheries Oceanography. 2023. V. 32. № 6. P. 541–558.
- Dulvy N.K., Rogers S.I., Jennings S., et.al. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: a biotic indicator of warming seas // J. Appl. Ecol. 2008. V. 45. № 4. P. 1029–1039.
- Fall J., de Lange Wenneck T., Bogsta B., et.al. Fish investigations in the Barents Sea winter 2022. IMR/PINRO Joint Report Series: 1–2023, 2023. 93 p.
- Francis R., Hurst R.J., Renwick J.A. An evaluation of catchability assumptions in New Zealand stock assessments // New Zealand Fisheries Assessment Report. 2001. V. 1. P. 1–37.
- Godo O.R. Factors affecting the reliability of groundfish abundance estimates from bottom trawl surveys // Marine fish behavior in capture and abundance estimation. Hoboken New Jersey: Wiley and Sons, 1994. P. 166–199.
- Gunderson D.R. Surveys of fisheries resources. New York: John Wiley & Sons, 1993. 248 p.
- ICES. Workshop on unavoidable survey effort reduction (WKUSER). ICES Sci. Rep. 2020. 92 p.
- ICES. Workshop on unavoidable survey effort reduction 2 (WKUSER2). ICES Sci. Rep. 2023. 103 p.
- Kimura D.K., Somerton D.A. Review of statistical aspects of survey sampling for marine fisheries // Rev. Fisheries Sci. 2006. V. 14. № 3. P. 245–283.
- Kotwicki S., Ianelli J.N., Punt A.E. Correcting density-dependent effects in abundance estimates from bottom-trawl surveys // ICES J. Mar. Sci. 2014. V. 71. № 5. P. 1107–1116.
- Kotwicki S., Ressler P.H., Ianelli J.N., et.al. Combining data from bottom-trawl and acoustic-trawl surveys to estimate an index of abundance for semipelagic species // Can. J. Fisheries Aquatic Sci. 2018. V. 75. № 1. P. 60–71.
- Maureaud A., Frelat R., Pécuchet L., et al. Are we ready to track climate-driven shifts in marine species across international boundaries? A global survey of scientific bottom trawl data // Global Change Biol. 2021. V. 27. № 2. P. 220–236.
- Oyafuso Z.S., Barnett L.A., Kotwicki S. Incorporating spatiotemporal variability in multispecies survey design optimization addresses trade-offs in uncertainty // ICES J. Mar. Sci. 2021. V. 78. № 4. P. 1288–1300.
- Oyafuso Z.S., Barnett L.A.K., Siple M.C., Kotwicki S. A flexible approach to optimizing the Gulf of Alaska groundfish bottom trawl survey design for abundance estimation // NOAA Tech. Memo. 2022. NMFS-AFSC-434. 142 p.
- Pinsky M.L., Mantua N.J. Emerging adaptation approaches for climate-ready fisheries management // Oceanography. 2014. V. 27. № 4. P. 146–159.
- Pope J.G., Shepherd J.G. A comparison of the performance of various methods for tuning VPAs using effort data // Ices J. Mar. Sci. 1985. V. 42. № 2. P. 129–151.
- Santora J.A., Rogers T.L., Cimino M.A., et.al. Diverse integrated ecosystem approach overcomes pandemic-related fisheries monitoring challenges // Nat. Commun. 2021. V. 12. № 1. P. 1–10.
- Shelton A.O., Thorson J.T., Ward E.J., Feist B.E. Spatial semiparametric models improve estimates of species abundance and distribution // Can. J. Fisheries Aquat. Sci. 2014. V. 71. № 11. P. 1655–1666.
- Shono H. Application of the Tweedie distribution to zero-catch data in CPUE analysis // Fisheries Research. 2008. V. 93. P. 154–162.
- Thompson P. L., Anderson S. C., Nephin J., et.al. Integrating trawl and longline surveys across

British Columbia improves groundfish distribution predictions // Can. J. Fisheries and Aquatic Sciences. 2023. V. 80. № 1. P. 195–210.

Thorson J.T., Clarke M.E., Stewart I. J., Punt A.E. The implications of spatially varying catchability on bottom trawl surveys of fish abundance: a proposed solution involving underwater vehicles // Can. J. Fisheries Aquat. Sci. 2013. V. 70. № 2. P. 294–306.

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.

Quinn T.J., Deriso R.B. Quantitative fish dynamics. New York: Oxford University Press, 1999. 560 p.

Wilberg M.J., Thorson J.T., Linton B.C., Berkson J. Incorporating time-varying catchability into population dynamic stock assessment models // Rev. Fisheries Sci. 2009. V. 18 № 1. P. 7–24.

Yalcin S., Anderson S.C., Regular P.M., English P.A. Exploring the limits of spatiotemporal and design-based index standardization under reduced survey coverage // ICES J. Mar. Sci. 2023. V. 80. № 9. P. 2368–2379.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF FISHERY RESEARCH

**THE SPATIOTEMPORAL STANDARDIZATION
OF THE STOCK INDEX AND REDUCTION OF HAULS
IN RESEARCH SURVEYS (ON THE EXAMPLE
OF RED KING CRAB IN THE BARENTS SEA)**

© 2024 y. S.V. Bakanev, A.V. Stesko, Yu.I. Zhak

*Polar branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries
and Oceanography, Russia, Murmansk, 183038*

The paper presents the results of the spatiotemporal standardization of the stock biomass index of red king crab in the Russian EEZ of the Barents Sea carried out using the generalized additive mixed effect model (GAMM) which was implemented in the sdmTMB library of the Renvironment. The spatiotemporal approach used in species distribution modelling within GAMM enables taking into account numerous environmental factors and fishing gears, thereby increasing the quality of the assessment especially in areas with data shortage. Additionally, in modelling the stock density for areas with no observations the space-time autocorrelation in between hauls is also taken into consideration.

Key words: Red king crab, Barents Sea, stock assessment, research survey