

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 674—688.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):674—688.

Научная статья
УДК [551.465.1:639.24](265.1)
doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-674-688

Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга

*Джимми Хуан Мартина-Васкес, Светлана Михайловна Гордеева,
Валерий Николаевич Малинин*

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
jimmymartinavasquez@gmail.com.

Аннотация. В данной работе рассматривается построение статистических моделей вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга за период с 1996 г. по 2020 г. на основе данных о температуре поверхностного слоя океана и рассчитанным значениям индекса апвеллинга, который определялся по скорости ветра в приводном слое атмосферы на основе теории Экмана. С этой целью использовались два метода: множественная линейная регрессия (МЛР) и дерево решений (ДР, decision trees). Показано, что они не только с высокой точностью описывают дисперсию индекса биомассы анчоуса *CPUE*, но и позволяют прогнозировать его на несколько лет. При этом метод ДР показал некоторые преимущества по сравнению с методом МЛР.

Ключевые слова: Перуанский апвеллинг, индекс апвеллинга, улов на единицу усилия, множественная линейная регрессия, дерево решений.

Для цитирования: Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Статистическое моделирование и прогноз вылова анчоуса в области Перуанского апвеллинга // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 674—688. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-674-688.

Original article

Statistical modeling and forecasting of anchovy catch in the peruvian upwelling area

Jimmy Juan Martina-Vasquez, Svetlana M. Gordeeva, Valery N. Malinin

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian Federation

Summary. This paper considers the construction of statistical models of anchovy catch in the Peruvian upwelling area for the period 1996—2020 based on the temperature of the ocean surface layer and calculated values of the upwelling index, which was determined by means of the wind speed in the atmospheric surface layer based on the Ekman theory. The catch per unit of fishing effort (*CPUE*) served as the anchovy biomass index. The Peruvian upwelling (PA) region was taken from 4° S to 40° S and was divided into 11 rectangular areas. For each area, the average annual values of the upwelling index (U_i) and Sea Surface Temperature values (T_i) were computed. Thus, the original sample included 22 variables. When constructing statistical models, two methods were used: multiple linear regression (MLR) and decision trees (DT). The optimal *CPUE* model using the MLR method includes 5 variables, the first being the upwelling index

© Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н., 2024

in the region 9, which describes 53% of the *CPUE* variance. At step 5, the variables describe 88 % of the *CPUE* variance. The DT model has a higher rate of growth of the determination coefficient and reduction of the standard error of the model. Already at the third branch, its accuracy reaches the accuracy of the MLR model at step 5. At the first branch, the U_9 describes 67 % of the *CPUE* variance, and it is included in the model twice (at branches 1 and 3). An experimental *CPUE* forecast for 2017—2020 using both models showed full compliance between the actual and predicted *CPUE* values. The successful use of these methods is largely due to the upwelling index in the region 9, which describes more than half of the *CPUE* variance using the MLR method and two-thirds using the DT method.

Keywords. Peruvian upwelling, upwelling index, catch per unit of effort, multiple linear regression, decision trees.

For citation: Martina-Vasquez J. J., Gordeeva S. M., Malinin V.N. Statistical modeling and forecasting of anchovy catch in the Peruvian upwelling area. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):674—688. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-674-688.

Введение

К числу наиболее продуктивных областей апвеллинга в Мировом океане (МО) относится Перуанский апвеллинг (ПА), который является крупнейшим по вылову рыбы [1—3]. Его формирование обусловлено холодным меридиональным Перуанским течением, берущим начало из северной ветви Антарктического циркумполярного течения и текущим на север вдоль побережья Южной Америки. В тропиках в зоне пассата под действием ветра сила Кориолиса отклоняет его на запад. В результате область ПА переходит в огромную зону юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО), в которой добывается наибольшее количество ставриды в Мировом океане (4—4,5 млн. т). В течение нескольких десятилетий до 1990 г. Россия вела здесь активный вылов ставриды, который достигал 27 % от её суммарной добычи в ЮВТО [4]. Подъем богатых питательными веществами вод к поверхности океана способствует формированию в областях апвеллинга высокой биологической продуктивности [5, 6], которая обеспечивает устойчивый промысел пелагических видов рыб. В частности, в области ПА, занимающей акваторию около 0,02 % от площади МО, добывается около 20 % мирового улова рыбы [7—11].

К важнейшим абиотическим факторам формирования рыбопродуктивности относятся температура поверхностного слоя океана (ТПО) и интенсивность апвеллинга. Влияние температуры воды на жизнедеятельность морских организмов многогранно [12]. Она может ускорять (замедлять) рост отдельных видов морских организмов и даже приводить к их массовой гибели.

Согласно теории Экмана, апвеллинг в Перуанском течении возникает под действием пассатов, дующих вдоль побережья Южной Америки и вызывающих перенос поверхностных вод с отклонением влево от направления ветра [13, 14]. В результате происходит подъем в эвфотический слой океана промежуточных вод с повышенным содержанием биогенных веществ. Вследствие этого в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для воспроизводства и развития фито- и зоопланктона, служащего кормовой базой для различных видов пелагических рыб [15—16]. В работе [17] рассмотрены изменения в локализации участков промысла и величине вылова основных промысловых гидробионтов в Перуанском подрайоне в годы с Эль-Ниньо и при его отсутствии. Показана «активная

реакция» промысла на изменяющиеся условия среды в периоды Эль-Ниньо, проявляющаяся в смещении участков промысла на меньшие глубины, особенно в пределах исключительной экономической зоны Перу.

Наиболее важным видом, поддерживающим пищевую цепь в ПА, является анчоус *Engraulis ringens* [18], который, кроме своей пищевой ценности, играет большую роль в экономике Перу и в мировом производстве рыбной муки [19]. В некоторые годы вылов анчоуса достигает 10 % мирового улова [20]. Естественно, это самый важный промысел в Перу и к тому же самая интенсивно эксплуатируемая рыба в мировой истории [21]. Однако причины «перуанской загадки» огромной биологической продуктивности района ПА и значительного объема добычи рыбы в настоящее время еще не до конца выявлены [20].

Цель данной работы состоит в построении статистических моделей вылова анчоуса в области ПА с использованием индексов апвеллинга (ИА), рассчитанных по данным о скорости ветра в приводном слое атмосферы на основе теории Экмана и натурных данных о ТПО, а также в проверке использования этих моделей для прогноза вылова анчоуса на несколько лет.

Исходные данные и методы их обработки

Исходными данными по ТПО послужила база данных GODAS (Global Ocean Data Assimilation System), которая основана на квазиглобальной конфигурации модели GFDL MOM.v3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model). Пространственная область, охватываемая GODAS, простирается от 75° ю.ш. до 65° с.ш. и имеет разрешение $1^\circ \times 1^\circ$, увеличенное до $1/3^\circ$ в направлении север-юг в пределах 10° от экватора. Зона ПА принята в границах от 4° ю.ш. до 40° ю.ш. [22]. Всего в области ПА было выделено 216 в узлах сетки, для которых из базы данных GODAS выбраны среднемесячные значения ТПО за период 1996—2020 гг.

Для расчета ИА в данной работе использовались зональная и меридиональная компоненты ветра в приводном слое океана в известном архиве реанализа NCEP/DOE AMIP-II (Reanalysis-2) (https://apdrc.soest.hawaii.edu/datadoc/ncp2_mon.php) [23], который с 1979 г. является естественным продолжением архива NCEP Reanalysis-1 [24]. В этих архивах используется комбинированный подход к усвоению всех видов исходной информации, но основным из них является спутниковое зондирование. Архив R-2 охватывает период наблюдений с 1979 г. по настоящее время с использованием обновленных моделей прогнозирования и усвоения данных. Пространственная область реализации модели простирается от 88,5° ю.ш. до 88,5° с.ш. и имеет разрешение $1,8^\circ \times 1,8^\circ$ [24]. Для региона ПА в границах от 4° до 40° ю.ш. выделено 73 точки в узлах сетки (рис. 1). Для указанных точек из этого архива отобраны средние месячные значения зональной и меридиональной составляющих скорости ветра за период с 1996 г. по 2020 г.

Поскольку вертикальные скорости движения вод в океане малы и зачастую определяются с большими ошибками, то определение интенсивности апвеллинга оказывается весьма сложной задачей, поэтому её довольно часто определяют

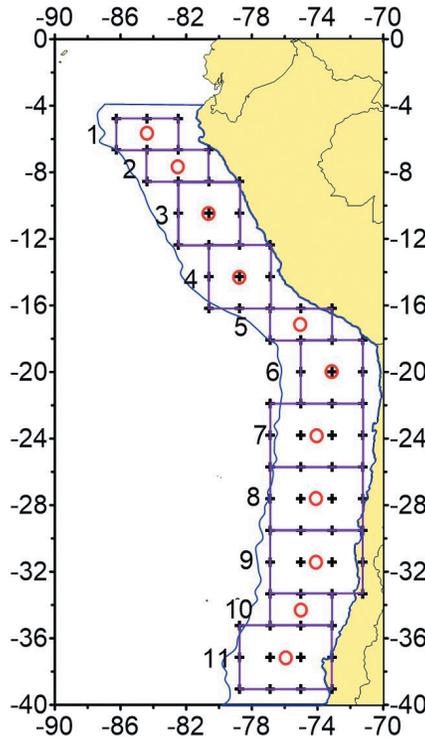


Рис. 1. Схема области Перуанского апвеллинга. Индекс апвеллинга рассчитывался для выделенных прямоугольных районов [29]. Кружками показаны центры районов, в которых значения ТПО использовались в статистических моделях.

Fig. 1. Diagram of the Peruvian upwelling region. The upwelling index were calculated for the selected rectangles [29]. The circles indicate the centers of the regions where SST values were used in the statistical models.

косвенными методами [12]. В связи с этим достаточно широкое распространение получили различные индексы апвеллинга. Так, к числу простейших индексов относится разность температур воды (ΔT_w) между прибрежными и океанскими водами, которая измеряется на одной широте с целью оценки охлаждающего эффекта апвеллинга [25—27]. Однако серьезным недостатком такого подхода является неоднозначность выбора меры расстояния между прибрежными и океаническими водами.

Более обоснованным считается индекс апвеллинга (ИА), предложенный Бакуном в 1973 г. [28], который получил довольно широкое распространение в зарубежных исследованиях. Расчёт этого индекса основан на расчете геострофических компонент ветра в каждой точке расчетной области с использованием среднемесячных градиентов приземного атмосферного давления, которые необходимы для определения оценок экмановского переноса. В этом случае рассчитанный полный

поток водной массы характеризует только дрейфовую составляющую течения и не отражает вертикального поступления воды из глубин океана. Методика оценки интегрального ИА, предложенная в [12], лишена этого недостатка, поскольку использует реальные скорости ветра, вследствие чего возможно определять вертикальный поток массы на уровне глубины трения. Отметим, эта методика применялась в области ПА [29], показала хорошие результаты, поэтому используется в настоящей работе. Исходя из выделенных 73 точек, область ПА предварительно была разбита на 11 прямоугольных районов (рис. 1). Согласно методике [12], ИА рассчитывался как среднее значение для выделенных районов.

В качестве косвенного показателя биомассы анчоуса [30] можно воспользоваться оценками улова на единицу рыболовного усилия *CPUE* (Catch Per Unit Effort). Систематический мониторинг *CPUE* проводился Перуанским морским институтом (IMARPE, Instituto del Mar del Perú на испанском языке) в период с 1996 г. по 2020 г.

Для построения статистических моделей *CPUE* применялись 2 метода многомерного статистического анализа (МСА): множественная линейная регрессия (МЛР) и дерево решений (ДР, decision trees). МЛР — самый популярный метод МСА, имеет множество модификаций и приводится практически во всех пакетах прикладных статистических программ (ППСП). В данной работе использовалась его классическая версия, в которой отбор значимых переменных выполнялся методом включения на основе частной корреляции. Модель считалась оптимальной на k -том шаге, если при включении в модель новой $k+1$ переменной она перестает быть значимой по критерию Фишера или какая-либо переменная в модели становится незначимой по критерию Стьюдента. В качестве порога значимости использовалось условие $\alpha = 0,05$.

Метод ДР является одним из самых популярных методов Data Mining, который определяется как анализ экспериментальных данных с целью нахождения неочевидных, объективных и практически полезных закономерностей. Описание этого метода дается в работах [31—34]. В наиболее простом виде дерево решений — это способ представления классифицирующих правил в виде иерархической структуры. Пока что данный метод не получил заметного распространения в гидрометеорологии, хотя в работах [35, 36, 37] показано, что он имеет преимущество по сравнению с МЛР в точности описания дисперсии предиктанта и построения его модели более лаконичной структуры. Моделирование годовых значений *CPUE* проводилось в пакете Statistica с использованием алгоритма CART [38].

Результаты расчётов и их обсуждение

Статистическая модель CPUE методом МЛР. Исходными данными послужили 11 переменных ТПО (T_i) в центрах выделенных районов и столько же значений ИА (U_i), характеризующих их средние оценки для этих районов. В результате расчётов получена оптимальная стандартизированная (в безразмерном виде) модель МЛР, включающая пять переменных:

$$CPUE = 0,910 U_9 - 0,628 U_3 - 0,478 T_3 + 0,550 T_{11} - 0,376 T_8. \quad (1)$$

Коэффициент детерминации этого уравнения равен $R^2 = 0,88$, а относительная ошибка (δ) в долях СКО *CPUE* равна 0,34. Последовательность вхождения предикторов в уравнение (1) представлена в табл. 1. Нетрудно видеть, что наиболее важным предиктором является ИА в районе 9 (U_9), т. е. в чилийской зоне ПА, который описывает больше половины (53 %) дисперсии *CPUE*. Это означает, что океанографические условия в Чилийской зоне оказывают важное влияние на формирование *CPUE* анчоуса. Следующий по значимости ИА в районе 3 (U_3), который находится в прибрежной зоне Перу. Далее в модель входит ТПО в перуанской и чилийской зонах ПА (T_3, T_{11}, T_8).

Таблица 1

Статистические оценки моделей МЛР для *CPUE*
по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана

Statistical estimates of MLR Models for *CPUE*
from upwelling index and sea surface temperature Data

Шаг модели	Предиктор, входящий в модель	Период 1996—2020 гг.		Период 1996—2016 гг.	
		R^2	δ	R^2	δ
1	U_9	0,53	0,67	0,53	0,67
2	U_3	0,68	0,55	0,68	0,55
3	T_3	0,77	0,47	0,77	0,47
4	T_{11}	0,84	0,40	0,84	0,40
5	T_8	0,88	0,34	0,88	0,34

Для оценки прогностических возможностей уравнения (1) исходная выборка была разделена на зависимую (1996—2016 гг.) и независимую (2017—2020 гг.). Для зависимой выборки был выполнен расчет статистической модели *CPUE*. Результаты показали, что она совпадает с основной моделью (табл. 1). Это означает почти полное совпадение коэффициентов регрессии, их высокую устойчивость во времени. Отсюда следует, что опытный прогноз *CPUE* за 2017—2020 гг. также должен быть очень близок к его фактическим значениям. Действительно, как видно из рис. 2, фактические и прогностические значения *CPUE* имеют минимальные различия.

Статистическая модель CPUE методом дерева решений. Исходными данными для построения модели послужили рассмотренные выше значения индекса апвеллинга и ТПО за период с 1996 г. по 2020 г. На рис. 3 представлены результаты измерения стоимости ошибок перекрестной проверки на независимой выборке (CV-cost) и стоимости тестирования на обучающем наборе (Resubstitution cost) в зависимости от количества узлов дерева (числа ветвлений). Оценка стоимости обучения (Resubstitution cost) зависит от толщины дерева. Чем оно толще, тем оно точнее будет описывать зависимую переменную, поэтому в общем случае эта оценка обратно пропорциональна коэффициенту детерминации, полученному из обучающейся выборки. Распределение ошибок кроссвалидации (CV-cost) показывает, что дерево номер 5 имеет наименьшую ошибку независимых оценок, поэтому его можно считать оптимальным. Для рассмотренной модели ДР рассчитаны

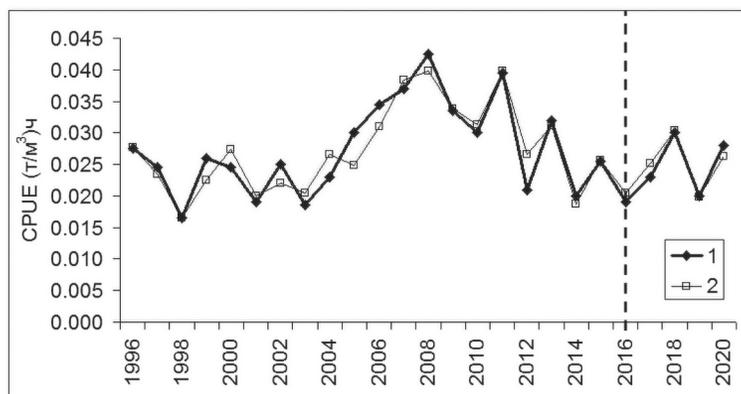


Рис. 2. Межгодовая изменчивость фактических (1) и вычисленных по модели МЛР (2) значений $CPUE$. Прогностические оценки $CPUE$ рассчитаны для периода 2017—2020 гг.

Fig. 2. Interannual variability of actual (1) and MLR model-calculated (2) $CPUE$ values. $CPUE$ forecast estimates are calculated for the period 2017—2020.

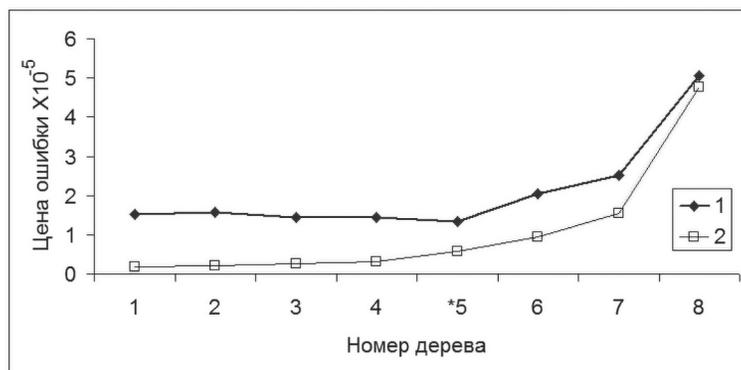


Рис. 3. Распределение значений цены ошибки кросс-проверки (CV-cost) (1) и цены проверки на обучающей (зависимой) выборке (Resubstitution cost) (2) в зависимости от числа узлов дерева для модели $CPUE$ за период с 1996 г. по 2020 г.

Fig. 3. Distribution of the values of the cross-validation error cost (CV-cost) (1) and the cost of validation on the training (dependent) sample (Resubstitution cost) (2) depending on the number of tree nodes for the $CPUE$ model for the period 1996—2020.

статистические характеристики: коэффициент детерминации и относительная ошибка за период с 1996 г. по 2020 г., оценки которых представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, уже при трех ветвлениях точность модели ДР совпадает с моделью МЛР, а для пяти ветвлений ($R^2 = 0,94$, $\delta = 0,23$) она заметно точнее ее. Уже на первом ветвлении индекс U_9 описывает 67 % дисперсии $CPUE$, а с учётом третьего ветвления — 75 % дисперсии. Дело в том, что он входит в модель

дважды (на 1 и 3 ветвлениях). В этом особенность моделей ДР, которые допускают использование исходных переменных неограниченное число раз и при этом они строят непараметрические модели, т. е. исходные данные свободны от теоретического распределения.

Таблица 2

Статистические оценки моделей дерева решений для *CPUE* по данным об индексе апвеллинга и температуре поверхности океана
 Statistical evaluations of decision tree models for *CPUE* using upwelling index and sea surface temperature data

Число ветвлений	Предиктор, входящий в модель	Период 1996—2020 гг.		Период 1996—2016 гг.	
		R^2	δ	R^2	δ
1	U_9	0,67	0,56	0,71	0,53
2	T_1	0,80	0,44	0,80	0,44
3	U_9	0,88	0,34	0,88	0,34
4	U_{10}	0,93	0,25	0,94	0,24
5	U_7	0,94	0,23	0,95	0,21

Далее по аналогии с моделью МЛР для зависимой выборки (1996—2016 гг.) строилась модель ДР, статистические характеристики которой также приводятся в табл. 2. Как и в случае с моделью МЛР, мы видим почти полное соответствие рассчитанных характеристик. Учитывая скорость нарастания коэффициента детерминации, можно ограничиться третьим ветвлением, при котором $R^2 = 0,88$, т.е. модель ДР соответствует модели МЛР на пятом шаге. Несмотря на это следует отметить принципиальное отличие моделей между собой. Оно состоит в том, что совпадает только первый предиктор U_9 . На других шагах (ветвлениях) они отличаются друг от друга.

На рис. 4 приводится модель ДР для трех ветвлений. Дерево 3 имеет достаточно простой вид. На первом ветвлении разделителем является ИА в районе 9 (рис. 1). Если он меньше 622,46 мм/мес, то в 14 случаях из 21 отмечались низкие значения *CPUE* со средним значением 0,0231 (т/м³)ч. Если ИА больше 622,46 мм/мес, то, наоборот, в 7 случаях *CPUE* становится высоким (в среднем 0,0356 (т/м³)ч). На втором ветвлении уточняется формирование 14 значений низких оценок *CPUE* под влиянием ТПО в районе 1. Если T_1 становится ниже < 21,6 °С, то отмечается 4 оценки *CPUE* около нормы, если больше > 21,6 °С, то 10 аномально низких оценок *CPUE*. На третьем ветвлении разделителем является опять индекс U_9 . При аномально высоких значениях $U_9 > 667,7$ мм/мес имеем три аномально высоких оценки *CPUE*. Если U_9 находится в диапазоне от 667,7 до 662,4 мм/мес., то определяются 4 оценки *CPUE* чуть выше нормы. Очевидно, что ИА в районе 9 можно считать наиболее важным фактором для оценки *CPUE* анчоуса в пределах перуанского шельфа, поскольку он одновременно является первым предиктором в модели МЛР.

На рис. 5 представлено сопоставление вычисленных по модели ДР и фактических значений *CPUE*. Нетрудно видеть их хорошее соответствие, в том числе и

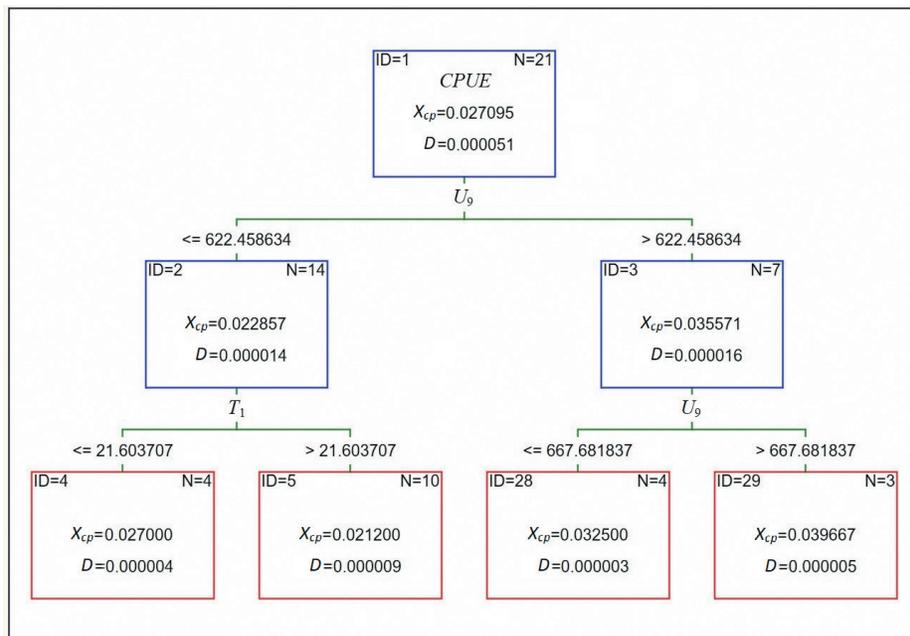


Рис. 4. Модель дерева решений, состоящего из трех ветвлений, описывающих 88 % дисперсии годовых значений $CPUE$ (X_{cp} — среднее значение, D — дисперсия).

Fig. 4. The decision tree model, consisting of three branches, describing 88% of the variance in annual $CPUE$ values (average X_{cp} , variance D).

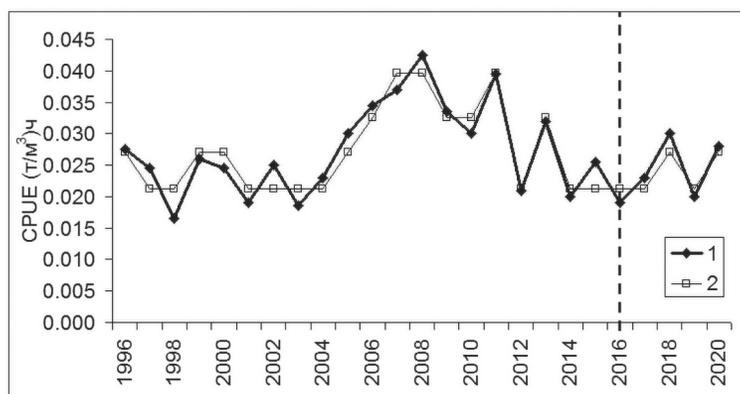


Рис. 5. Межгодовая изменчивость фактических (1) и вычисленных по модели ДР (2) значений $CPUE$. Прогностические оценки $CPUE$ рассчитаны за период с 2017 г. по 2020 г.

Fig. 5. Interannual variability of actual (1) and calculated (2) $CPUE$ values by the DT model. $CPUE$ forecast estimates are calculated for the period 2017—2020.

прогностических оценок *CPUE*. Можно также отметить разные способы подбора вычисленных оценок *CPUE* по моделям ДР и МЛР к фактическим значениям. В первом случае используется принцип нахождения минимального геометрического расстояния, во втором — принцип сравнения по изменчивости, т. е. выбирается такая переменная, которая дает максимальный вклад в описание дисперсии исходного ряда. Успешное использование этих методов в значительной степени обусловлено индексом апвеллинга в районе 9, который описывает более половины дисперсии *CPUE* методом МЛР и более двух третей методом ДР. Однако причины столь высокой корреляционной связи U_9 с *CPUE* не совсем понятны. Возможно, она обусловлена наличием между подрайонами 1-5 (Перу) и 9 (Чили) (см. рис. 1) так называемой дальней связи — тесной зависимости параметров среды и промысла, обусловленной единым регулирующим механизмом — переносом теплозапаса и вихревой динамики вод в северном направлении в пределах Перуанского течения ЮВТО. Этот вопрос выходит за рамки данной работы и требует дополнительного исследования.

Заключение

В данной работе впервые рассматривается построение статистических моделей биомассы анчоуса в области Перуанского апвеллинга за период с 1996 г. по 2020 г. на основе данных о температуре поверхностного слоя океана и рассчитанным значениям индекса апвеллинга, который определялся по скорости ветра в приводном слое атмосферы на основе теории Экмана. Индексом биомассы анчоуса послужил улов на единицу рыболовного усилия *CPUE* (Catch Per Unit Effort). Хотя данный индекс является косвенным, он довольно хорошо отражает численность биомассы анчоуса. Область ПА принималась от 4° ю.ш. до 40° ю.ш. и была разбита на 11 прямоугольных районов. Для каждого района вычислялись среднегодовые значения индекса апвеллинга (U_i) и значения ТПО (T_i). Таким образом, исходная выборка включала 22 переменных.

При построении статистических моделей использовались два метода многомерного статистического анализа: множественная линейная регрессия (МЛР) и дерево решений (ДР, decision trees). Оптимальная модель *CPUE* методом МЛР включает пять переменных, первой из них является U_9 , которая описывает 53 % дисперсии *CPUE*. На пятом шаге переменные описывают 88 % дисперсии *CPUE*. Показано, что при уменьшении объема выборки на четыре года сохраняется высокая устойчивость коэффициентов регрессии во времени. Это позволило выполнить опытный прогноз *CPUE* на 2017—2020 гг., согласно которому между фактическими и прогностическими значениями *CPUE* отмечаются минимальные расхождения.

Модель ДР имеет более высокую скорость роста коэффициента детерминации и снижения стандартной ошибки модели. Уже на третьем ветвлении ее точность достигает точности модели МЛР на пятом шаге. На первом ветвлении индекс U_9 описывает 67 % дисперсии *CPUE*, причем он входит в модель дважды (на 1 и 3 ветвлениях), вследствие чего его вклад повышается до 75 %. Визуализация модели

ДР позволила наглядно показать, как происходит отбор оценок *CPUE* в зависимости от реперных значений переменных U_9 и T_1 на 3 ветвлении. Опытный прогноз *CPUE* на 2017—2020 гг. также подтвердил полное соответствие фактических и прогностических значений *CPUE*.

Сравнение методов МЛР и ДР показало, что последний имеет некоторые преимущества в точности описания *CPUE*, в визуализации получаемых результатов и более понятной их интерпретации. Успешное использование этих методов в значительной степени обусловлено индексом апвеллинга в районе 9, который описывает более половины дисперсии *CPUE* методом МЛР и три четверти методом ДР.

Список литературы

1. Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? // *Progress in Oceanography*. 2008. Vol. 79, P. 290—299. DOI: 10.1016/j.pcean.2008.10.027.
2. Heileman, S., Guevara R., Chavez F. et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas / «XVII-56 Humboldt current: LME # 13.» in *The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME)*, eds K. Sherman and G. Hempel (Nairobi: United Nations Environment Programme). 2009. 15 p.
3. Gutierrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change // *Environmental Development*. 2016. Vol. 17, P. 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
4. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб.: РГГМУ, 2009. 278 с.
5. Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973 // *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr.* 1974. Vol. 12. No. 3. P. 187—201.
6. Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa / *Rapports et Proces-verbaux des Réunions. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982. Vol. 180. P. 148—183.
7. Bakun A., Field D., Redondo-Rodriguez A. et al. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems // *Global Change Biology*. 2010. Vol. 16. 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
8. Bakun A., Black B., Bograd S. et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems // *Current Climate Change Reports*. 2015. Vol. 1. P. 85—93. doi: 10.1007/s40641-015-0008-4.
9. Espinoza-Morriberon D., Echevin V., Colas F. et al. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. P. 5423—5444. doi:10.1002/2016JC012439.
10. Castillo R., Dalla L., García W. et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017 // *Fisheries Oceanography* 2019. Vol. 28. P. 389—401. doi:10.1111/fog.12419.
11. *FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation / FAO – Rome: Food and Agriculture Organization*, 2022. 266 p. ISBN 978-92-5-136364-5 Text (visual): immediate.
12. Малинин В. Н., Чернышков П. П., Гордеева С. М. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб: Гидрометеиздат. 2002. 156 с.
13. Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System // *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009. P. 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
14. Ramos J. E., Tam J., Aramayo V. et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, 4800. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
15. Духова Л. А., Сапожников В. В. Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов // *Труды ВНИРО*. 2014. Том 152. С. 85—100.

16. Сапожников В. В., Чернышков П. П., Шнар В. Н. и др. Комплексные исследования пелагической экосистемы района Канарского апвеллинга на СТМ «Атлантида» в июле-августе 2006 г. // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 3. С. 473—476.
17. Краснобородько О. Ю. О повторяемости очень сильных и катастрофических Эль-Ниньо и их влиянии на промысел в Перуанском подрайоне Юго-Восточной Пацифики // *Труды АтлантНИРО*. 2018. Том 2. № 2. Калининград: АтлантНИРО. С. 66—83.
18. Espinoza P., Bertrand A. Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics provides a new vision of the Humboldt Current System // *Progress in Oceanography*. 2008. Vol. 79. P. 215—227.
19. Bakun A., Broad K. Climate and fisheries: Interacting paradigms, scales, and policy approaches. The IRI-IPRC Pacific Climate-Fisheries Workshop, Honolulu, 14—17 November. 2002.
20. Massing J. C., Schukat A., Auel H. et al. Toward a Solution of the «Peruvian Puzzle»: Pelagic Food-Web Structure and Trophic Interactions in the Northern Humboldt Current Upwelling System Off Peru // *Front. Mar. Sci.* 2022. Vol. 8. P. 759—603.
21. Di Dario F., Hüne M., Pérez-Matus A., Vega R. *Engraulis ringens*. The IUCN Red List of Threatened Species. 2021. e.T183775A102904317. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T183775A102904317.en>. Accessed on 26 September 2024.
22. Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America* // *Ecological Studies*. 2001. Vol. 144. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bull. American Meteorological Society*. 2002. Vol. 83. No. 11. P. 1631—1644. doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
24. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. March 1996. Vol. 77. P. 437—472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
25. Wooster W.S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic // *Journal of Marine Research*. 1976. Vol. 34. No. 2. P. 131—141.
26. Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991 // *Journal of Geophysical Research*. 1994. Vol. 99. C7. P. 14197—14207.
27. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to *Octopus vulgaris* recruitment // *Oceanologica Acta*. 2000. Vol. 23. N. 4. P. 391—408. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)01113-0](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)01113-0).
28. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Technical Report NMFS SSRF-671. 1973. 103 p.
29. Мартина-Васкес Д. Х., Гордеева С. М., Малинин В. Н. Изменчивость индекса апвеллинга в области Перуанского течения // *Гидрометеорология и экология*, 2024. №75. С. 280—292.
30. Skalski J., Elaine K. Millspaugh J. “Analysis of population indices” in *Wildlife Demography: Analysis of Sex, Age, and Count Data*. Academic Press. 2005. P. 359—434.
31. Bramer M. *Principles of Data Mining*. Springer: 2007. 344 p.
32. Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth, Belmont, CA: 1984. 358 p.
33. *Classification and Regression Trees: textbook*. Electronic resource. URL: <http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/350/lectures/22/lecture-22.pdf> (free, 20.01.2018).
34. *Popular Decision Tree: Classification and Regression Trees (C&RT)*. Electronic resource. URL: <http://documents.software.dell.com/Statistics/Textbook/Classification-and-Regression-Trees> (free, 20.01.2018).
35. Гордеева С. М., Малинин В. Н. Использование Data Mining в задаче гидрометеорологического прогнозирования // *Ученые записки РГГМУ*. 2016. № 44. С. 30—44.
36. Гордеева С. М., Малинин В. Н. О предвычислении годового стока крупных рек европейской части России на основе метода деревьев решений (Decision Trees) // *Гидрометеорология и экология*. 2018. №50. С. 53—65. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292.
37. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Влияние влагообмена в Северной Атлантике на увлажнение Европейской части России и годовой сток Волги // *Водные ресурсы*, 2019, том 46, № 3, С. 318—332. DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332.

38. Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica Help. Electronic resource. URL: [http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/ Interactive Trees CRTCHAID_HIndex](http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/Interactive%20Trees%20C&RT%20CHAID_HIndex) (free, 20.01.2018).

References

- Bakun A., Weeks S. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? *Progress in Oceanography*. 2008; (79): 290—299. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.027.
- Heileman S., Guevara R., Chavez F. et al. Report: A Perspective on Changing Conditions in LMEs of the World's Regional Seas. "XVII-56 Humboldt current: LME # 13," in The United Nations Environment Programme Large Marine Ecosystem (UNEP-LME) (eds K. Sherman and G. Hempel). Nairobi: United Nations Environment Programme. 2009. 15 p.
- Gutierrez D., Akester M., Naranjo L. Productivity and sustainable management of the Humboldt current large marine ecosystem under climate change. *Environmental Development*. 2016; (17): 126—144. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.11.004.
- Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Promyslovaya okeanologiya yugo-vostochnoj chasti Tikhogo okeana. T. 1. Izmenchivost' faktorov sredi obitaniya = Fishery oceanology of south-east Pacific Ocean. Volume I. Variability of environmental factors*. St. Petersburg: RSHU, 2009: 278 p. (In Russ.).
- Herbland A., Voituriez B. La production primaire dans l'upwelling mauritanien en mars 1973. *Cah. O.R.ST.O.M., Sér. Océanogr*. 1974; 12(3): 187—201.
- Minas H. J. Nutrients and primary production in the upwelling region off Northwest Africa. *Rapports et Proces-verbaux des Réunion. Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 1982; (180): 148—183.
- Bakun A., Field D., Redondo-Rodriguez A. et al. Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology*. 2010; (16): 1213—1228. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.
- Bakun A., Black B., Bograd S. et al. Anticipated effects of climate change on coastal upwelling ecosystems. *Current Climate Change Reports*. 2015; (1): 85—93. DOI: 10.1007/s40641-015-0008-4.
- Espinoza-Morriberon D., Echevin V., Colas F. et al. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017; (122): 5423—5444. DOI: 10.1002/2016JC012439.
- Castillo R., Dalla L., García W. et al. Anchovy distribution off Peru in relation to abiotic parameters: A 32-year time series from 1985 to 2017. *Fisheries Oceanography*. 2019, (28): 389—401. DOI: 10.1111/fog.12419.
- FAO State of World Fisheries and Aquaculture. Towards Blue Transformation. FAO – Rome: Food and Agriculture Organization, 2022: 266 p. ISBN 978-92-5-136364-5 Text (visual): immediate.
- Malinin V. N., Chernyshkov P. P., Gordeeva S. M. *Kanarskiy apvelling: krupnomasshtabnaya izmenchivost' i prognoz temperatury vody = The Canarian upwelling: a Large-scale variability and forecast of water temperature*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 2002: 156 p. (In Russ.).
- Karstensen J., Ulloa O. Peru–Chile Current System. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 2009; 385—392. DOI: 10.1016/B978-012374473-9.00599-3.
- Ramos J. E., Tam J., Aramayo V. et al. Climate vulnerability assessment of key fishery resources in the Northern Humboldt Current System. *Scientific Reports*. 2022; (12), 4800. DOI: 10.1038/s41598-022-08818-5.
- Dukhova L.A., Sapozhnikov V.V. Hydrochemical indicators of primary production in the zones of the Peruvian and Canary upwellings. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2014; (152): (85—100). (In Russ.).
- Sapozhnikov V.V., Chernyshkov P.P., Schnar V.N. et al. Comprehensive studies of the pelagic ecosystem of the Canary upwelling region on the Atlantis STM in July-August 2006. *Okeanologiya = Oceanology*. 2007; 47(3): (473—476). (In Russ.).
- Krasnoborodko, O. On the frequency of very strong and catastrophic El Niño and their impact on fisheries in the Peruvian subarea of the Southeast Pacific. *Trudy AtlantNIRO=Proceedings of AtlantNIRO*. 2018; (2)2. Kaliningrad: AtlantNIRO: (66—83). (In Russ.).

18. Espinoza P., Bertrand A. Revisiting Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) trophodynamics provides a new vision of the Humboldt Current System. *Progress in Oceanography*. 2008; (79): 215—227. DOI: 10.1016/j.pocean.2008.10.022.
19. Bakun A., Broad K. Climate and fisheries: Interacting paradigms, scales, and policy approaches. The IRI-IPRC Pacific Climate-Fisheries Workshop, Honolulu, 14–17 November. 2002.
20. Massing J. C., Schukat A., Auel H. et al. Toward a Solution of the «Peruvian Puzzle»: Pelagic Food-Web Structure and Trophic Interactions in the Northern Humboldt Current Upwelling System Off Peru. *Frontiers in Marine Science*. 2022;(8):(759603). DOI: 10.3389/fmars.2021.759603
21. Di Dario F., Hüne M., Pérez-Matus A., Vega R. *Engraulis ringens*. The IUCN Red List of Threatened Species 2021: e.T183775A102904317. DOI: 10.2305/IUCN.UK.2021-1.RLTS.T183775A102904317.en. Accessed on 26 September 2024.
22. Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds) Coastal Marine Ecosystems of Latin America. *Ecological Studies*. 2001; (144): 229—244. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-04482-7_17.
23. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J. et al., NCEP – DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002; 83(11): 1631—1644. DOI: 10.1175/BAMS-83-11-1631.
24. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al., The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996; (77): 437—472. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
25. Wooster W.S., Bakun A., McLain D. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research*. 1976; 34(2): 131—141.
26. Nykjær L., Van Camp L. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along north-west Africa and Portugal from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*. 1994; 99(C7): 14197—14207.
27. Demarcq H., Faure V. Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment. *Oceanologica Acta*. 2000; 23(4): 391—408. DOI: 10.1016/S0399-1784(00)01113-0.
28. Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946—71. U.S. Department of Commerce Publication, NOAA Tech. Rep., NMFS SSRF-671. 1973: 103 p.
29. Martina-Vasquez J., Gordeeva S. M., Malinin V. N. Variability of the upwelling index in the Peruvian Current region. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024; (75): (280—292). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292. (In Russ.).
30. Skalski J., Elaine K. Millspaugh J. “Analysis of population indices” in *Wildlife Demography: Analysis of Sex, Age, and Count Data*. Academic Press. 2005: 359—434.
31. Bramer M. *Principles of Data Mining*. Springer, 2007: 344 p.
32. Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth, Belmont, CA, 1984: 358 p.
33. *Classification and Regression Trees: textbook*. Electronic resource. URL: <http://www.stat.cmu.edu/~cshalizi/350/lectures/22/lecture-22.pdf> (free, 20.01.2018).
34. *Popular Decision Tree: Classification and Regression Trees (C&RT)*. Electronic resource. URL: <http://documents.software.dell.com/Statistics/Textbook/Classification-and-Regression-Trees> (free, 20.01.2018).
35. Gordeeva S. M., Malinin V. N. Using Data Mining in the Problem of Hydrometeorological Forecasting. *Uchonye zapiskii RSHU = Scientific notes RSHU*. St. Petersburg: RSHU. 2016; (44): (30—44). (In Russ.).
36. Gordeeva S. M., Malinin V. N. On predicting annual runoff of large rivers of European Russia based on Decision Trees method. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2018; (50): (53—65). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-280-292. (In Russ.).
37. Malinin V. N., Gordeeva S. M. Effect of Moisture Exchange in the Northern Atlantic on European Russia Moistening and Annual Volga Runoff. *Vodnyye resursy = Water resources*. 2019; 46(3): (318—332). DOI: 10.31857/S0321-0596463318-332. (In Russ.).
38. *Interactive Trees (C&RT, CHAID): Statistica Help*. Electronic resource. URL: http://documentation.statsoft.com/STATISTICAHelp.aspx?path=Gxx/Indices/InteractiveTreesCRTCHAID_HIndex (free, 20.01.2018)

Информация об авторах

Мартина-Васкес Джимми Хуан, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета, jimmymartinavasquez@gmail.com.

Гордеева Светлана Михайловна, кафедра прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Российского государственного гидрометеорологического университета, gordeeva@rshu.ru.

Малинин Валерий Николаевич, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры прикладной океанографии и комплексного управления прибрежными зонами Российского государственного гидрометеорологического университета, malinin@rshu.ru.

Information about authors

Martina Vásquez Jimmy Juan, PhD student of the Russian State Hydrometeorological University.

Gordeeva Svetlana Mikhailovna, Department of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management, Russian State Hydrometeorological University.

Malinin Valery Nikolaevich, Doctor of Geographical Sciences, Professor of Applied Oceanography and Integrated Coastal Zone Management of the Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 18.10.2024

Принята к печати 02.12.2024

The article was received on 18.10.2024

The article was accepted on 02.12.2024