ПАДЕНИЕ ЗАПАСОВ И ПОЛНЫЙ ЗАПРЕТ ПРОМЫСЛА АЗОВСКОГО СУДАКА ПОДТВЕРЖДАЮТ ДОЛГОСРОЧНЫЙ МОДЕЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ

Ю.В. Тютюнов^{1,2}, Л.И. Титова², И.Н. Сенина³, Л.В. Дашкевич¹

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН), г. Ростов-на-Дону, Россия

² Южный федеральный университет (ЮФУ), г. Ростов-на-Дону, Россия

³ Collecte Localisation Satellites (CLS), Space Oceanography Division, Ramonville Saint-Agne, France
yuri.tutyunov@yandex.ru; ltitova@sfedu.ru;
isenina@groupcls.com; ldashkev@ssc-ras.ru

Аннотация. Двадцать лет назад по результатам стохастических экспериментов с имитационной моделью долгосрочной динамики популяции азовского судака, верифицированной по данным наблюдений 1950–1981 гг. за запасом, выловами, температурой и солёностью Азовского моря, нами был сделан вывод о высокой вероятности коллапса данной популяции в течение 35 лет, обусловленного повышением солёности моря. При этом согласно модели, даже гипотетическое полное прекращение промысла лишь незначительно снижает риск чрезмерного падения численности популяции. Ретроспективная валидация модели, проведённая в настоящее время по данным наблюдений за запасом судака в течение периода 1982–2008 гг. выявила достаточно хорошее соответствие прогноза модели реальной динамике. В частности, согласно оценкам ихтиологов, с 2005 г. численность взрослых особей популяции азовского судака не превышала 4 млн. штук. Более того, с 2018 г. правилами рыболовства для Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна введён полный запрет на вылов этого вида. Дополнительные эксперименты с моделью указывают на то, что помимо продолжающегося осолонения, негативное воздействие на воспроизводство популяции азовского судака оказывает наблюдающееся повышение среднегодовых значений температуры моря. При этом обнаружено, что в современный период эффект от потепления является не менее значительным, чем влияние роста солёности. Выполненное исследование демонстрирует эффективность применения простых (минимальных) стохастических моделей для долгосрочного прогнозирования популяционной динамики и оптимизации промысла на основе экспериментов Монте-Карло.

Ключевые слова: *Sander lucioperca* L., популяционная динамика, стохастическая модель, метод Монте-Карло, риск квази-вымирания

Модель

Имитационная модель динамики эксплуатируемой рыбной популяции была построена в конце 1990-х гг. для проведения стохастических экспериментов в целях долгосрочного прогноза динамики и оценки риска квази-вымирания популяции азовского судака [1, 2]. Модель представляет собой систему разностных уравнений, описывающую динамику трёх возрастных групп: сеголеток N_0^t , годовиков N_1^t , и взрослых особей, достигших возраста 2 года и старше, N_2^t , с годовым шагом $t=0,1,2,\dots$:

$$N_0^{t+1} = (a_1 N_1^t + a_2 N_2^t) e^{-b(N_1^t + a_2 N_2^t)} e^{\left(\frac{\sigma_1^2 - \sigma_0^2}{\sigma_1^2}\right)} e^{\left(\frac{\sigma_1^2 - \sigma_0^2}{\sigma_1^2}\right)} \quad (1)$$

$$N_1^{t+1} = p_0 N_0^t (1 - h_1^{t+1}); \quad (2)$$

$$N_2^{t+1} = (p_1 N_1^t + p_2 N_2^t) (1 - h_2^{t+1}), \quad (3)$$

где p_i – доля выживших в течение временного шага особей i -ой возрастной группы ($i=0,1,2$), а h_i – доля вылавливаемых в течение временного шага особей каждой возрастной группы. Как видно из уравнения (1), воспроизводство описывается модифицированной функцией Риккера [3], дополнительно учитывающей влияние на воспроизводство судака

таких факторов среды, как температура и солёность Азовского моря. Параметры a_1 и a_2 – соответственно коэффициенты плодовитости годовиков и взрослых особей; b – коэффициент внутривидовой конкуренции; S_0 и T_0 – оптимальные значения факторов среды, а σ_s и σ_T характеризуют толерантность вида к флуктуациям соответствующих факторов. Суммарный улов года t вычисляется по формуле

$$C^t = w_1 h_1 p_0 N_0^{t-1} + w_2 h_2 (p_1 N_1^{t-1} + p_2 N_2^{t-1}). \quad (4)$$

где w_1 и w_2 – средние индивидуальные веса годовика и взрослой особи судака.

Основной прикладной задачей, для решения которой создавалась модель, являлось обоснование промысловых ограничений, потенциально способных предотвратить чрезмерное падение запасов азовского судака вследствие осолонения моря. Модель (1)–(4) также позволяла оценить опасность непреднамеренного прилова годовиков, обусловленного недостаточной селективностью орудий лова. Параметры модели были идентифицированы с использованием данных, предо-

ставленных Азовским НИИ рыбного хозяйства, образующими временные ряды, характеризующие динамику моделируемой экологической системы с 1950 по 1982 года (33 осреднённые по годовому периоду записи), а также литературных источников [4–6]. Ряды включали оценки численностей сеголеток, годовиков и взрослых особей судака, среднегодовые показатели солёности и температуры Азовского моря. Качество идентификации было оценено с использованием процедуры бутстрэппинга (*residual bootstrap*) [7]. Детали идентификации представлены в работе [2].

Прогноз

С идентифицированной моделью проводились имитационные эксперименты по методу Монте-Карло, в которых для сгенерированных случайных значений температуры и солёности моря рассчитывался прогноз динамики численностей возрастных групп судака на заданное количество лет. Пучки траекторий, полученные таким образом для различных стратегий промыслового изъятия, использовались для оценки ожидаемых уловов, размеров стада, а также вероятностей квази-вымирания (*quasi-extinction*) популяции [8, 9] (см. рис. 1).

Рисунок 1 — Зависимость риска квази-вымирания популяции судака от промыслового изъятия годовиков и взрослых

На основе проведённых экспериментов с критическим уровнем квази-вымирания равным 4.8 млн. взрослых особей, что соответствует 10 % от максимального значения в ряду ихтиологических оценок запаса, нами был сделан достаточно пессимистично звучащий для конца 1990-х гг. вывод о высокой вероятности коллапса популяции азовского судака в течение следующих 35 лет [1, 2]. Согласно приведённым на рис. 1 модельным расчётам, даже при гипотетическом прекращении промысла риск квази-вымирания популяции превышал 70 %. При ежегодном изъятии третьей части взрослых особей прогнозируемый риск составлял 86 %.

Валидация модели

Пессимистический прогноз, данный двадцать лет назад, вполне оправдался – с 2005 г. оценка численности взрослых особей судака не превышает 4 млн. штук [10]. Более того, запрет промысла азовского судака, который рассматривался как гипотетический сценарий имитационного эксперимента, сегодня также стал реальностью – с января 2018 г. любой вылов этого вида запрещён правилами рыболовства для Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна [11].

Ретроспективная валидация корректности работы модели с рядами фактических значений солёности

и температуры с 1982 по 2008 гг., также показала хорошее соответствие траектории модели оценкам численностей возрастных групп судака в эти годы [10, 12–18].

Результаты расчётов, при проведении которых предполагалось ежегодное изъятие 7 % годовиков и взрослых особей, представлены на рис. 2. В частности, полученные траектории корректно отображают намечившееся в период 1982–2000 гг. восстановление популяции, обусловленное наблюдавшимся в данный период опреснением Азовского моря, а также новую фазу снижения численностей всех трёх возрастных групп судака, начавшуюся с 2000-х годов.

Рисунок 2 — Модельная и наблюдаемая динамика численности сеголеток (А), годовиков (В), взрослых особей (С) и вылова азовского судака: 1950–1981 гг. – идентификация, с 1982 г. – валидация модели. Пунктиром показан уровень квази-вымирания

Заключение

В настоящий период состояние популяции азовского судака является предметом серьёзного беспокойства специалистов в области рыбохозяйственных и природоохранных исследований в Азово-Черноморском бассейне. Наблюдается дальнейшее снижение запаса данного вида, обусловленное уменьшением пресного стока рек Дона и Кубани и осолонением Азовского моря.

Кроме того, с 1983 г. значительно повысились среднегодовые значения температуры моря. Аномально высокие температуры в таком мелком водоёме как Азовское море являются причиной возникновения зон гипоксии, частота образования которых увеличилась в последнее десятилетие, в том числе, в восточной части моря и Таганрогском заливе [19, 20]. Дополнительные эксперименты с моделью также указывают на то, что повышение среднегодовых значений температуры Азовского моря оказывает крайне негативное воздействие на воспроизводства судака.

Несмотря на продемонстрированную эффективность применения простых стохастических моделей, подобных модели (1)–(4), для долгосрочного прогнозирования динамики промысловых популяций, сегодня эта модель нуждается в развитии и совершенствовании. Изменившиеся условия функционирования экосистемы Азовского моря требуют проведения новых, как полевых, так и модельных исследований влияния на воспроизводство и выживаемость рыб климатических, гидрологических факторов, и перестройки структуры трофического сообщества моря.

Публикация подготовлена в ходе реализации ПФИ Президиума РАН №20 «Новые вызовы климатической системы земли» Подпрограмма «Обеспечение устойчивого развития Юга России в условиях климатических, экологических и техногенных вызовов», № госрегистрации проекта АААА-А18-118011990324-5 (Тютюнов, Дашкевич), БЧ ГЗ ЮФУ, тема № 1.5169.2017/8.9, «Фундаментальные и прикладные задачи математического моделирования» (Титова), проекта РФФИ № 18-01-00453 А, «Мультистабильные пространственно-временные сценарии в популяционных системах» (Тютюнов).

Список литературы

1. Тютюнов Ю.В., Сенина И.Н., Титова Л.И., 2000. Экономический и экологический критерии оптимизации промысла Азовского судака. Опыт имитационного моделирования // Компьютерное моделирование. Экология: учебное пособие / под ред. Г.А. Угольниченко. М.: Вузовская книга. С. 58–78.

2. Tyutyunov Yu., Senina I., Jost C., Arditi R., 2002. Risk assessment of the harvested pike-perch population of the Azov Sea // Ecological Modelling. Vol. 149. P. 297–311. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00478-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00478-1)
3. Ricker W.E., 1954. Stock and recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. Vol. 11. P. 559–623. <https://doi.org/10.1139/f54-039>
4. Гонтарев Н.П., Симонов А.И., Затучная Б.М., Гершанович Д.Е., 1991. Азовское Море // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат. Т. 5. 236 с.
5. Бронфман А.М., Воловик С.П., Козлитина С.В., Попов И.В., Кучай Л.А., 1979. Статистическая Структура Океанологических и Биологических Параметров Экосистемы Азовского Моря. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та. 160 с.
6. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д., 1979. Гидрологические и Гидрохимические Основы Продуктивности Азовского Моря. М.: Пищевая промышленность. 288 с.
7. Efron B., Tibshirani R.J., 1993. An Introduction to the Bootstrap. London: Chapman and Hall. 143 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4541-9>
8. Ginzburg L.R., Slobodkin L.B., Jonson K., Bindman A.G., 1982. Quasiextinction probabilities as a measure of impact on population growth // Risk Analysis. Vol. 2. P. 171–181. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1982.tb01379.x>
9. Akçakaya H.R., Ginzburg L.R., 1991. Ecological risk analysis for single and multiple populations // Species conservation: a population biological approach / Eds. A. Seitz, V. Loeschke. Basel: Birkhäuser Verlag. P. 78–87.
10. Подойницын Д.А., 2010. Современное экологическое состояние популяции судака обыкновенного в Азовском море // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. № 4. С. 111–112.
11. Протокол XXX сессии Украинско-Российской Комиссии по вопросам рыболовства в Азовском море, 23–25 октября 2018 г., г. Киев (Украина), 11 февраля 2019 г., г. Ростов-на-Дону (Россия), 23 с.
12. Белоусов В.Н., 2000. Динамика популяции азовского судака под влиянием антропогенных, биотических и абиотических факторов // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоёмов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (1998–1999 гг.). Ростов н/Д: Изд-во БКИ. С. 88–96.
13. Белоусов В.Н., 2002. Особенности миграций судака *Stizostedion lucioperca* Азовского моря в 1990–2000 гг. // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоёмов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (2000–2001 гг.). М: Вопросы рыболовства. С. 279–291.
14. Белоусов В.Н., 2004. Сезонные изменения пищевой активности и темпов прироста биомассы полупроходного судака *Stizostedion lucioperca* Азовского моря // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоёмов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (2002–2003 гг.). Ростов н/Д: Изд-во Медиа-Пресс. С. 131–137.
15. Белоусов В.Н., 2004. Формирование и использование запаса полупроходного судака *Stizostedion lucioperca* L. в условиях изменяющегося режима Азовского моря. Автореф. дис. канд. биол. наук. Краснодар: КубГАУ. 24 с.
16. Подойницын Д.А., 2006. Состояние популяции полупроходного судака (*Sander lucioperca* (L.)) в Азовском море в современный период // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоёмов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (2004–2005 гг.). Ростов н/Д: Изд-во Медиа-Пресс. С. 199–207.
17. Подойницын Д.А., 2010. Эколого-биологическая оценка состояния популяции судака обыкновенного (*Sander lucioperca* L.) в условиях антропогенного преобразования Азово-Донского бассейна. Автореф. дис. канд. биол. наук. Ростов-н/Д: ЮФУ. 22 с.
18. Цуникова Е.П., Попова Т.М., Порошина Е.А., Нефедова Е.А., 2008. Обеспеченность нерестово-выростных площадей Азово-Кубанского района производителями полупроходных рыб, их рыбоводно-биологическое состояние и масштабы воспроизводства судака и тарани в 2006–2007 гг. // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоёмов Азово-Черноморского бассейна. Сб. науч. тр. (2006–2007 гг.). Ростов н/Д: Изд-во Диапазон. С. 270–293.
19. Никитина А.В., Руднева Т.В., Камышиникова Т.В., Дурагина В.В., Бокарева Т.А., 2015. К вопросу о формировании заморных зон в восточной части Азовского моря // Современные проблемы науки и образования. № 1–1. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19509>
20. Кулыгин В.В., Герасюк В.С., Дашкевич Л.В., 2018. Модельная оценка содержания растворенного кислорода в водах Таганрогского залива на основе спутниковой информации // Информация и космос. № 1. С. 120–126.

STOCK DROP AND FULL PROHIBITION OF HARVESTING OF AZOV PIKEPERCH CONFIRM LONG-TERM MODELLING FORECAST

Yu.V. Tyutyunov^{1,2}, L.I. Titova², I.N. Senina³, L.V. Dashkevich¹

¹ Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS), Rostov-on-Don, Russia

² Southern Federal University (SFedU), Rostov-on-Don, Russia

³ Collecte Localisation Satellites (CLS), Space Oceanography Division, Ramonville Saint-Agne, France
yuri.tyutyunov@yandex.ru; ltitova@sfedu.ru; isenina@groupcls.com; ldashkev@ssc-ras.ru

Abstract. Twenty years ago we predicted a high risk of collapse for the pikeperch population of the Azov Sea during next 35 years due to increasing salinity of the sea water. The prediction was based on stochastic simulations with a model of the pikeperch population and assessment of the quasi-extinction risk, identified from time-series of observed stocks, catches, temperature and salinities of the sea collected during period 1950–1982 and provided by the. According to results of the Monte-Carlo experiments, even hypothetical prohibition of fishing could not help to restore the abundance of the pikeperch in the Azov Sea. Nowadays retrospective verification of the model demonstrates that the model prediction is in a good correspondence with real dynamics of the pikeperch population in 1982–2008. In particular, according to ichthyologists' estimations, since 2005 abundance of adult pikeperch in the sea did not exceed 4 mln individuals. Moreover, from 2018 any harvesting of this species is strictly prohibited by the fishing rules in the Azov-Black Sea region with exception for purposes of scientific research and artificial restocking. Results of additional simulations suggest that besides increasing salinity, the growing average annual temperature also negatively impacts reproduction and survival of the Azov Sea pikeperch. The presented results demonstrate effectiveness of simple (minimal) stochastic models for long-term forecast of population dynamics and harvesting optimization on the base of Monte-Carlo simulations.

Keywords: Sander *Lucioperca L.*, population dynamics, stochastic model, Monte-Carlo method, quasi-extinction risk

References

1. Tyutyunov Yu.V., Senina I.N., Titova L.I., 2000. Economical and ecological criteria of harvesting optimization of Azov pikeperch. Experience of simulation modeling / In: Ougolnitsky, G.A. (ed.). Computer Simulation. Ecology. Moscow: The Higher School Book. P. 58–78. [In Russian]
2. Tyutyunov Yu., Senina I., Jost C., Arditi R., 2002. Risk assessment of the harvested pike-perch population of the Azov Sea // Ecological Modelling. Vol. 149. P. 297–311. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00478-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00478-1) [In English]
3. Ricker W.E., 1954. Stock and recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. Vol. 11. P. 559–623. <https://doi.org/10.1139/f54-039> [In English]
4. Goptarev N.P., Simonov A.I., Zatulnaia B.M., Gershanovich D.E., 1991. Azov Sea // Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas of USSR. Sankt-Petersburg: Gydrometeoizdat. Vol. 5. 236 p. [In Russian]
5. Bronfman A.M., Volovik S.P., Kozlitina S.V., Popov I.V., Kuchay L.A., 1979. Statistical Structure of Oceanological and Biological Parameters of the Azov Sea Ecosystem. Rostov-on-Don: Rostov University Publishing House. 160 p. [In Russian]
6. Bronfman A.M., Dubinina V.G., Makarova G.D., 1979. Hydrological and Hydrochemical Basics of the Azov Sea Productivity. Moscow: Pishchevaia promyshlennost. 288 p. [In Russian]
7. Efron B., Tibshirani R.J., 1993. An Introduction to the Bootstrap. London: Chapman and Hall. 143 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-4541-9> [In English]
8. Ginzburg L.R., Slobodkin L.B., Jonson K., Bindman A.G., 1982. Quasiextinction probabilities as a measure of impact on population growth // Risk Analysis. Vol. 2. P. 171–181. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1982.tb01379.x> [In English]
9. Akçakaya H.R., Ginzburg L.R., 1991. Ecological risk analysis for single and multiple populations // Species conservation: a population biological approach / Eds. A. Seitz, V. Loeschke. Basel: Birkhäuser Verlag. P. 78–87. [In English]
10. Podoyntsyn D.A., 2010. Modern ecological state of pike perch population in the Azov Sea // Izvestia vys'shih uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. No. 4. P. 111–112. [In Russian]
11. Protocol of XXX session of Ukrainian-Russian Commission on fisheries problems in the Azov Sea, 23–25 October 2018, Kiev (Ukraine), 11 February 2019, Rostov-on-Don (Russia), 23 p. [In Russian]
12. Belousov V.N., 2000. Population dynamics of the Azov pikeperch population under the influence of anthropogenic, biotic, and abiotic factors // Basic problems of fishery and protection of fishing waterbodies of the Azov-Black sea basin. Collection of research papers (1998–1999). Rostov-on-Don: BKI Publishing. P. 88–96. [In Russian]
13. Belousov V.N., 2002. Peculiarities of migrations of pikeperch *Stizostedion lucioperca* of the Azov Sea in 1990–2000 // Basic problems of fishery and protection of fishing waterbodies of the Azov-Black sea basin. Collection of research papers (2000–2001). Moscow: Voprosy rybolovstva. P. 279–291. [In Russian]

14. *Belousov V.N.*, 2004. Seasonal variations of foraging activity and biomass increase of semi-migratory pikeperch *Stizostedion lucioperca* of the Azov Sea // Basic problems of fishery and protection of fishing waterbodies of the Azov-Black sea basin. Collection of research papers (2002–2003). Rostov-on-Don: Media-Press Publishing House. P. 131–137. [In Russian]
15. *Belousov V.N.*, 2004. Formation and use of the stock of semi-migratory pikeperch *Stizostedion lucioperca* L. under conditions of changing regime of the Azov Sea. Author's abstract of thesis of cand. biol. sci. Krasnodar: Kuban State University. 24 p. [In Russian]
16. *Podoyunitsyn D.A.*, 2006. State of population of semi-migratory pikeperch (*Sander Lucioperca* (L.)) in the Azov Sea in modern period // Basic problems of fishery and protection of fishing waterbodies of the Azov-Black sea basin. Collection of research papers (2004–2005). Rostov-on-Don: Media-Press Publishing House. P. 199–207. [In Russian]
17. *Podoyunitsyn D.A.*, 2010. Eco-biological assessment of a state of the pikeperch population (*Sander Lucioperca* L.) under conditions of anthropogenic transformation of the Azov-Don basin. Author's abstract of thesis of cand. biol. sci. Rostov-on-Don: Southern federal university. 22 p. [In Russian]
18. *Tsunnikova E.P., Popova T.M., Poroshina E.A., Nefedova E.A.*, 2008. Provision of spown-growth areas of the Azov-Kuban region with mature semi-migrating fish, their piscicultural-biological state and reproduction scale of pikeperch, roach in 2006–2007. // Basic problems of fishery and protection of fishing waterbodies of the Azov-Black sea basin. Collection of research papers (2006–2007). Rostov-on-Don: Diapason Publishing House. P. 270–293. [In Russian]
19. *Nikitina A.V., Rudneva T.V., Kamysnikova T.V., Duryagina V.V., Bokareva T.A.*, 2015. On the problem of formation of fish-kill zones in the Eastern part of the Azov Sea // Modern problems of sciences and education. No. 1–1. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19509> [In Russian]
20. *Kulygin V.V., Gerasiuk V.S., Dashkevich L.V.*, 2018. Modelling assessment of concentration of dissolve oxygen in waters of the Taganrog on the basis of satellite information // Informatsia i Kosmos. No. 1. P. 120–126. [In Russian]