

УДК 551.509+551.467

Метод сезонных прогнозов температуры поверхности океана и состояния морского льда на основе модели Земной системы ИВМ РАН и системы подготовки данных Гидрометцентра России

Реснянский Ю.Д.¹, Зеленко А.А.¹, Степанов В.Н.¹, Струков Б.С.¹, Хан В.М.^{1,2}, Володин Е.М.^{2,1}, Грицун А.С.², Тарасевич М.А.^{2,1}, Брагина В.В.^{2,1}

¹ *Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

² *Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва, Россия*

Метод сезонных прогнозов температуры поверхности океана и состояния морского льда на основе модели Земной системы ИВМ РАН и системы подготовки данных Гидрометцентра России разработан Гидрометцентром России совместно с Институтом вычислительной математики им. Г.И. Марчука Российской академии наук в рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ). Метод испытывался в соответствии с Программой испытаний, утвержденной директором ФГБУ «Гидрометцентр России» 08.02.2024 года.

Прогностическая технология

Прогностическая технология, обеспечивающая реализацию метода, построена на базе глобальной модели Земной системы ИВМ РАН [10, 16, 17] и системы генерации ансамбля начальных состояний [2]. Исходными для определения начальных состояний являются данные реанализа ERA5 [14] для атмосферы и деятельного слоя суши, а также данные SODA3.4.2 [11] (ретроспективные прогнозы) и Системы усвоения океанографических данных (СУОД) Гидрометцентра России [1, 3, 7] (квазиоперативные прогнозы) для океана и морского льда.

Сезонные прогнозы составлялись с использованием двух версий модели Земной системы ИВМ РАН: INM-CM5 и INM-CM6. Прогнозы включали в себя ансамбли из 20 реализаций в версии INM-CM5 и 10–30 реализаций в версии INM-CM6. Объектом прогнозирования, наряду с метеорологическими переменными, являлись среднемесячные аномалии – отклонения от соответствующих модельных или контрольных норм температуры поверхности океана (ТПО) и характеристики морских льдов на сроки до 6–9 месяцев. Основные сведения о модели и прогностической технологии представлены в статьях [4, 6, 8, 9, 18].

Результаты испытаний

Качество метода для двух версий прогностической модели оценивалось по результатам ретроспективных прогнозов за 1991–2019 гг. для INM-CM5, 1991–2020 гг. для INM-CM6 и по результатам квазиоперативных прогнозов за 2021–2023 гг. для INM-CM5 и за 2022–2024 гг. для INM-CM6. Рассматривались показатели качества, рекомендуемые ВМО для оценки долгосрочных прогнозов [15]. Оценки успешности прогнозов ТПО рассчитывались по акватории Мирового океана и его отдельных

районов (тропики, район Эль-Ниньо). Оценки ледовых прогнозов рассчитывались для Арктики и Антарктики.

Ретроспективные прогнозы. Ретроспективные прогнозы ТПО, составлявшиеся по двум версиям модели Земной системы INM-CM5 и INM-CM6, оказались успешными (значимые коэффициенты корреляции аномалий $ACC > 0,37$, преимущественно положительные значения показателя качества по среднему квадрату ошибки для сравнения с климатическим прогнозом $MSSS$) для заблаговременностей до 3 месяцев для Мирового океана и до 4 месяцев для тропической зоны и района Эль-Ниньо. Значения ACC слабо зависели от стартовой даты прогнозов и уменьшались с ростом заблаговременности. Наиболее успешными оказались прогнозы по району “Эль-Ниньо-3.4” с $ACC 0,73–0,86$ для прогнозов на первый месяц и $0,40–0,69$ для прогнозов на четвертый месяц. Прогнозы по INM-CM6 систематически обыгрывали прогнозы по INM-CM5 на $0,1–0,3$ единиц ACC .

Степень успешности ретроспективных прогнозов площади льда в Арктике (метод определения площади см. в [12]), оцениваемая по показателям ACC и $MSSS$, существенно зависела от начальных сроков прогнозирования. Наибольший интервал заблаговременностей с успешными прогнозами получился для сентябрьских стартовых дат с наименьшей ледовитостью в момент старта прогноза. Для объема арктических льдов более успешные по ACC и $MSSS$ ретроспективные прогнозы получились только для осенних стартовых дат (сентябрь–декабрь).

Более подробная информация о верификации ретроспективных сезонных прогнозов ТПО и ледовых характеристик на основе модели Земной системы ИВМ РАН представлена в [5].

Квазиоперативные прогнозы. Оценки квазиоперативных прогнозов проводились для отдельных прогностических расчетов, выполняемых в 2021–2024 гг. по двум версиям модели ИВМ РАН. Более высокие показатели ACC для ТПО по модели INM-CM6 в сравнении с INM-CM5 получились и в квазиоперативных прогнозах. Типичные в этот период значения ACC получились даже выше, чем в ретроспективных прогнозах, в ряде случаев достигая $0,8–0,9$.

Средние по Мировому океану оценки ACC квазиоперативных прогнозов ТПО по INM-CM5 ожидаемо снижались с ростом заблаговременности, изменяясь от $0,38–0,61$ для первого прогностического месяца до $0,13–0,30$ для шестого прогностического месяца. Для тропической зоны (20° ю. ш. – 20° с. ш.) от $0,39–0,81$ для первого прогностического месяца до $0,10–0,50$ для шестого прогностического месяца. Такие прогнозы можно считать успешными (значимые пространственные $ACC > 0,27$) для заблаговременностей до 4 месяцев для Мирового океана и до 5 месяцев для тропической зоны.

Для Мирового океана зависимость оценок прогнозов ТПО от приуроченности стартового месяца к тому или иному сезону не особенно выражена, в то время как в районе Эль Ниньо (Nino-3.4) менее успешными получаются прогнозы от стартовых месяцев с ноября по февраль вследствие, вероятно, попадания прогностического интервала в диапазон так называемого весеннего прогностического барьера [13].

Значения площади арктических льдов в серии квазиоперативных прогнозов с моделью INM-CM5 за 2022–2023 гг. получились преимущественно завышенными (на $10–15\%$) в сравнении с данными NSIDC (Национального центра по снегу и льдам США). Отличия прогнозируемых значений от данных NSIDC оказались наибольшими для зимних месяцев с января по апрель (более 10%) и наименьшими

для мая 2022 г. (0–8 %) и сентября 2023 г. (2–10 %). Преимущественно завышенными оказались и прогнозы площадей в Антарктике с еще большими в сравнении с Арктикой типичными отклонениями от данных NSIDC в 15–30 %.

Показатели качества АСС для сплоченности льдов в Арктике испытывали большие колебания от срока к сроку и нередко получались отрицательными. Вместе с тем отчетливо просматривалось повышение качества прогнозов по модели INM-CM6 в сравнении с INM-CM5. Число прогнозов сплоченности со значимыми положительными АСС по модели INM-CM6 за этот период превышало 20, тогда как ни один из прогнозов по модели INM-CM5 таких значимых оценок не имел.

Вероятностные оценки квазиоперативных прогнозов сплоченности льдов в Арктике в терминах показателя ROC характеризуются значениями $ROC = 0,50–0,59$ для градации «ниже нормы», $ROC = 0,55–0,71$ для градации «норма» и $ROC = 0,55–0,75$ для градации «выше нормы». Таким образом, оценки прогнозов во всех трех градациях оказываются выше случайных с наилучшими результатами для градации «выше нормы».

Качество прогнозов ТПО и ледовых характеристик по INM-CM6 в большинстве случаев превосходило качество прогнозов по INM-CM5. Из сравнения оценок прогнозов ТПО и ледовых условий с оценками зарубежных центров следует, что оценки качества прогнозов по модели INM-CM6 сопоставимы с таковыми по зарубежным моделям, подтверждая соответствие построенной на модели ИВМ РАН прогностической системы мировому уровню успешности прогнозов и о наличии у нее эффективного прогностического потенциала на сезонных масштабах времени.

Выводы

По итогам рассмотрения представленного метода **Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета** на заседании 26 июня 2024 г. сочла целесообразным: «Одобрить и рекомендовать к внедрению в прогностическую работу ФГБУ «Гидрометцентр России» и Северо-Евразийского климатического центра (СЕАКЦ) Метод сезонных прогнозов температуры поверхности океана и состояния морского льда на основе модели Земной системы ИВМ РАН и системы подготовки данных Гидрометцентра России наряду с использованием ранее внедренных в ФГБУ «ААНИИ» методов прогнозирования ледовых условий в Северном Ледовитом океане и его морях». Внедрение метода с сентября 2024 г. подтверждено актом ФГБУ «Гидрометцентр России» № 2 ЦМКП/2024 от 10 сентября 2024 года.

Список литературы

1. Вильфанд Р.М., Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д. Усвоение океанографических данных как одна из ключевых задач оперативной океанологии // *Гидроакустика*. 2023. № 53(1). С. 107-117.
2. Воробьева В. В., Володин Е. М. Экспериментальные исследования сезонной предсказуемости погоды, выполненные на основе климатической модели ИВМ РАН // *Математическое моделирование*. 2020. Том 32, № 11. С. 47-58. DOI: <https://doi.org/10.20948/mm-2020-11-04>.
3. Думанская И.О., Зеленко А.А., Мысленков С.А., Нестеров Е.С., Попов С.К., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2019. № 4 (374). С. 149-183.

4. Емелина С.В., Хан В.М., Семенов В.А., Воробьева В.В., Тарасевич М.А., Володин Е.М. Использование сезонных гидродинамических прогнозов модели INM-CM5 для оценки сроков начала пыления березы // Известия РАН. ФАО. 2023. Том 59, № 4. С. 407-416. DOI: 10.31857/S0002351523040053.

5. Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А., Степанов В.Н., Струков Б.С., Хан В.М., Володин Е.М., Грицун А.С., Тарасевич М.А., Брагина В.В. Верификация сезонных прогнозов температуры поверхности океана и ледовых характеристик на основе модели Земной системы ИВМ // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 4 (394). С. 6-38. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-6-38>.

6. Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А., Струков Б.С., Степанов В.Н., Хан В.М., Воробьева В.В., Тарасевич М.А., Грицун А.С., Володин Е.М. Оценка успешности воспроизведения океанографических полей в ретроспективных прогнозах по модели Земной системы INM-CM5 // Метеорология и гидрология. 2024. № 3. С. 5-20. DOI: 10.52002/0130-2906-2024-3-5-20.

7. Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Зеленько А.А. Релаксационный метод усвоения данных по сплоченности морского льда в модели NEMO-LIM3 с несколькими категориями ледяного покрова // Метеорология и гидрология. 2020. № 2. С. 65-77.

8. Тищенко В.А., Хан В.М., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. Метод сверхдолгосрочного прогнозирования состояния климатической системы на основе климатической модели ИВМ РАН INM-CM5 и системы подготовки данных Гидрометцентра России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2024. Информационный сборник № 51. С. 37-44.

9. Хан В.М., Тищенко В.А., Круглова Е.Н., Субботин А.В., Реснянский Ю.Д., Володин Е.М., Грицун А.С., Воробьева В.В., Тарасевич М.А. Система сезонного метеорологического прогноза на базе модели INM-CM5 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2024. Информационный сборник № 51. С. 21-36.

10. Bragina V., Voldin E., Chernenkov A., Tarasevich M. Simulation of climate changes in Northern Eurasia by two versions of the INM RAS Earth system model // Climate Dynamics. 2024. P. 7783-7797. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07306-y>.

11. Carton J.A., Chepurin G.A., Chen L. SODA3: A New Ocean Climate Reanalysis // J. Clim. 2018. Vol. 31. P. 6967-6983. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0149.1.

12. Comiso J.C., Bliss A.C., Gersten R., Parkinson C.L., Markus T. Current State of Sea Ice Cover. 2024. <https://earth.gsfc.nasa.gov/cryo/data/current-state-sea-ice-cover>, last access: 08-02-2024.

13. Duan W., Wei Ch. The 'spring predictability barrier' for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model // Int. J. Climatol. 2013. Vol. 33(5). P. 1280-1292. DOI: 10.1002/joc.3513.

14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S. The ERA5 global reanalysis // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2020. Vol. 146. P. 1999-2049.

15. Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS // WMO-No. 485. Vol. I. Geneva: WMO, 2002. 21 p.

16. Volodin E.M., Gritsun A.S. Simulation of Possible Future Climate Changes in the 21st Century in the INM-CM5 Climate Model // Izvestiya Atmospheric and Ocean Physics. 2020. Vol. 56, no. 3. P. 218-228. DOI: 10.1134/S0001433820030123.

17. Volodin E.M., Mortikov E. V., Kostykin S. V. et al. Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5 // Climate Dynamics. 2017. Vol. 49, no. 11. P. 3715-3734.

18. Vorobyeva V.V., Volodin E.M. Evaluation of the INM RAS climate model skill in climate indices and stratospheric anomalies on seasonal timescale // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2021. Vol. 73, no. 1. P. 1-12.