

Ривин Г.С., Никитин М.А., Розинкина И.А., Кислов А.В., Варенцов М.И., Платонов В.С.,  
Чумаков М.М.

УДК 551.582

## Использование региональной системы прогноза погоды COSMO-Ru для изучения гидрометеорологических условий на охотоморском шельфе: детализированные поля метеорологических элементов за 1985–2015 гг.

Г.С. Ривин<sup>1,2\*</sup>, М.А. Никитин<sup>1</sup>, И.А. Розинкина<sup>1</sup>, А.В. Кислов<sup>2</sup>, М.И. Варенцов<sup>2</sup>,  
В.С. Платонов<sup>2</sup>, М.М. Чумаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Гидрометцентр России», Российская Федерация, 123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 11-13

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, ГСП-1

<sup>3</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

\* E-mail: Gdaly.rivin@mail.ru

**Ключевые слова:** мезомасштабное моделирование климата, даунскейлинг, метод вложенных сеток, Охотское море, экстремальная скорость ветра.

**Тезисы.** При проектировании и обеспечении безопасной эксплуатации объектов обустройства нефтегазовых месторождений на шельфе Охотского моря необходимо использовать релевантные гидрометеорологические данные. Однако ни результаты наблюдений наземной сети, ни данные глобальных реанализов не позволяют учесть все (мезомасштабные) атмосферные процессы, способные вызывать опасные гидрометеорологические явления.

Для получения данных, учитывающих особенности мезомасштабной циркуляции, разработана методика даунскейлинга, которая использовалась при проведении расчетов с помощью климатической версии модели атмосферы COSMO (в конфигурации COSMO-Ru). С ее помощью создан архив детализированных полей метеорологических элементов за 1985–2015 гг. Расчет выполнен для трех пространственных модельных доменов с постепенно уменьшающимся шагом сетки (13,2; 6,6; 2,2 км). Домен с шагом расчетной сетки 2,2 км, охватывающий весь о. Сахалин и значительную часть акватории Охотского моря, использовался для моделирования синоптических ситуаций, характеризующихся экстремальной скоростью ветра.

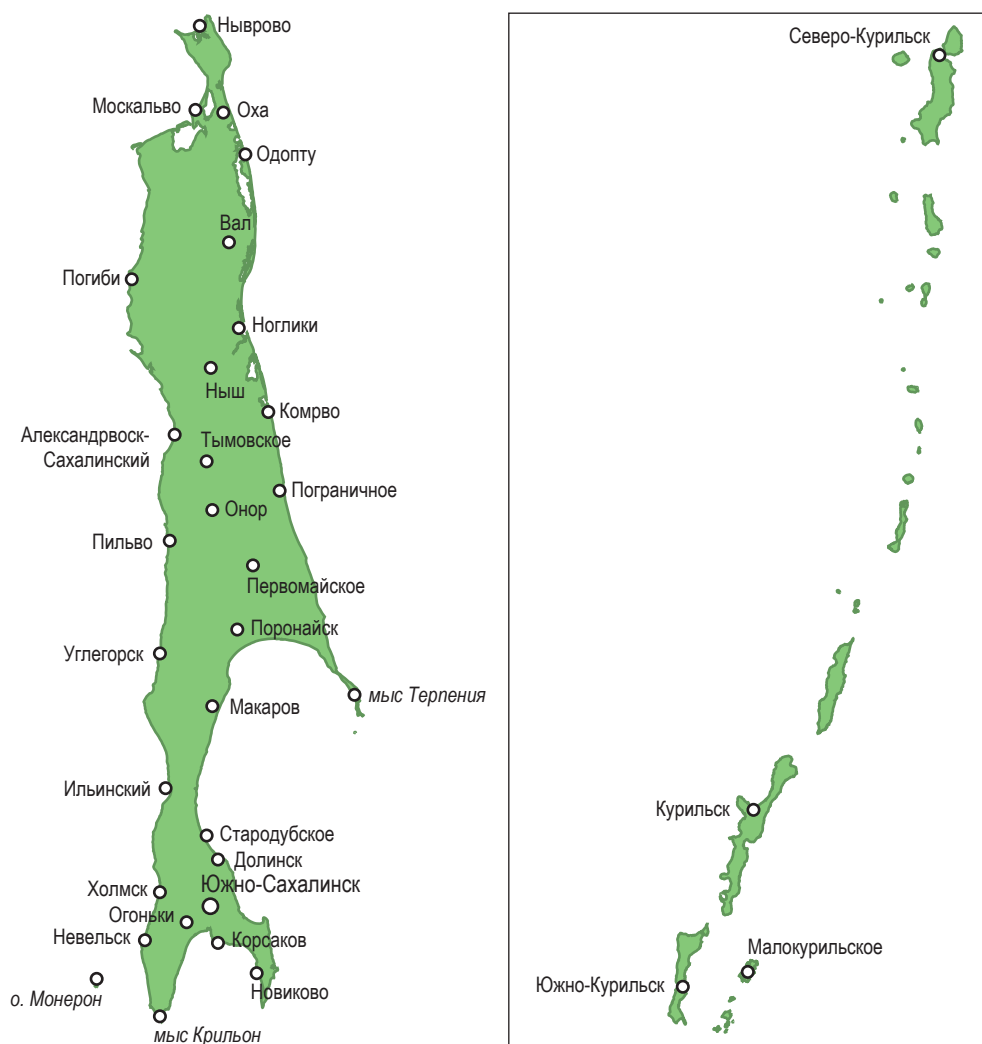
Результаты моделирования верифицированы по данным наземной метеорологической сети за 2014 г. Верификация показала, что модель адекватно воспроизводит данные наблюдений. Следует отметить, что при уменьшении шага расчетной сетки модели среднеквадратическое отклонение результатов моделирования от данных наблюдений, как правило, уменьшается.

Полученный архив использован для анализа экстремальных синоптических ситуаций в районе Южно-Кириного месторождения. Определено, что в этом районе в год наблюдались 6–12 случаев скоростей ветра выше 20 м/с и 1–3 случая скоростей ветра выше 25 м/с. Скорости ветра выше 30 м/с достаточно редки: за весь период моделирования (30 лет) отмечены только три подобных случая. Выявлен статистически значимый тренд увеличения числа случаев скоростей ветра свыше 20 м/с. Для скоростей ветра свыше 25 м/с подобный тренд отсутствует.

Повышение разрешения улучшает качество воспроизведения моделью полей основных метеорологических элементов, особенно при переходе к сетке с шагом 2,2 км.

При освоении новых нефтегазовых месторождений на шельфе Охотского моря необходимо учитывать не только геологические [1], но и гидрометеорологические опасности, угрожающие безаварийной эксплуатации объектов обустройства. Для этого требуется информация о климатических и экстремальных характеристиках в районах месторождений. Однако данные наблюдений, полученные на наземной сети Росгидромета в составе гидрометеорологических станций (ГМС) «Мыс Терпения», «Пограничное», «Ноглики», «Комрво», «Одонту» и др. (рис. 1), нельзя считать репрезентативными для района Южно-Кириного месторождения по следующим причинам. Во-первых, характер подстилающей поверхности существенно влияет на результаты метеорологических измерений, причем это влияние особенно проявляется в случае экстремальных атмосферных процессов. Во-вторых, данные на рассматриваемых ГМС существенно отличаются друг от друга, что не позволяет сделать





Источник: <http://www.sakhugms.ru/index.php/meteostantsii>

**Рис. 1. Карта расположения ГМС Росгидромета (показаны кружками) в населенных пунктах на о. Сахалин и Курильских островах**

обоснованного вывода о том, какая именно метеостанция лучше всего характеризует изучаемый район.

Еще один источник получения исходной гидрометеорологической информации за предыдущие десятилетия – данные глобального реанализа. Например, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (англ. ECMWF) предоставляет глобальный реанализ ERA-Interim<sup>1</sup> (доступен с 1979 г.) с шагом сетки  $\approx 77$  км [2]. Подобное пространственное разрешение позволяет воспроизводить атмосферные процессы синоптического масштаба  $\approx 800$  км, однако его не достаточно для воспроизведения большей части мезомасштабных циклонов, эволюция которых может вызывать опасные

явления. В связи с этим следует отметить, что данные ERA-Interim, как правило, содержат существенно заниженные экстремальные значения гидрометеорологических элементов.

Тем не менее задачу получения достоверной информации об экстремальных явлениях погоды можно решить благодаря мезомасштабным региональным моделям, использующим данные глобального реанализа в качестве входных параметров, т.е. применяя методику мезомасштабного даунскейлинга (другое название – «метод вложенных сеток»). Ее суть заключается в том, что данные реанализа используются в качестве начальных и граничных условий для модели с более высоким пространственным разрешением и улучшенной параметризацией физических процессов. При этом с целью обеспечения близости модельных полей основных метеорологических элементов

<sup>1</sup> См. <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/reanalysis-datasets/era-interim>



к реально наблюдавшимся применяется технология «спектрального подталкивания», или спектрального наджинга (*англ.* spectral nudging) [3, 4], предполагающая усвоение крупномасштабных составляющих атмосферной циркуляции из данных реанализа не только на боковых границах домена, но и внутри области моделирования, что ограничивает возможность региональной модели «уходить» от реалистичных условий. Учет крупномасштабных особенностей основан на разложении метеорологических полей региональной модели и реанализа в двумерный ряд Фурье с последующей корректировкой результатов регионального моделирования. Таким образом, методом даунскейлинга можно получить высокодетальный архив метеорологических элементов за длительный промежуток времени, например 30 лет.

В качестве модели высокого пространственного разрешения выбрана региональная негидростатическая модель атмосферы и деятельного слоя почвы, используемая в системе краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru [5]. Модель COSMO разрабатывается с 1998 г. в рамках Консорциума по мелкомасштабному моделированию (*англ.* COnsortium for Small-scale MOdelling). Исходную версию модели разрабатывала Немецкая служба погоды (*нем.* Deutscher Wetterdienst), затем к этому подключились метеорологические службы Швейцарии, Италии, Греции, Польши, Румынии, России и Израиля (страны перечислены в порядке вступления в Консорциум). Кроме того, модель COSMO используется в Саудовской Аравии, Бразилии, Южно-Африканской Республике, Индии, Пакистане, Малайзии, Индонезии, Филиппинах, Вьетнаме и других странах. Заметим, что развивающиеся страны имеют право работать с ней бесплатно, прочим же странам необходимо купить лицензию.

Модель COSMO основана на системе уравнений термогидродинамики (второй закон Ньютона, законы сохранения массы и энергии, уравнение состояния и уравнения переноса воды и ее преобразования во всех трех фазовых состояниях), описывающих сжимаемый поток воздуха во влажной атмосфере [6]. В связи с высокой сложностью система уравнений решается численно, а не аналитически. Уравнения аппроксимируются в конечно-разностном виде на сетке Аракавы – Шуберта [7].

Характерной особенностью модели COSMO является расчет на сетке со сдвинутыми полюсами. Как известно, вблизи географического полюса наблюдается сгущение меридианов, и решение конечно-разностных уравнений в районе полюса сопряжено с трудностями. Стремясь избежать затруднений, систему координат сдвигают так, чтобы экватор проходил примерно через центр расчетной области. В этом случае расстояния по меридиану и по параллели между соседними узлами сетки получаются близкими.

По результатам оперативных испытаний системы негидростатического краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru [8] Центральная методическая комиссия (ЦМКП) Росгидромета 11 апреля 2011 г. рекомендовала ФГБУ «Гидрометцентр России» внедрить ее версию с шагом сетки 7 км в оперативную практику в качестве базовой для численного прогноза ряда метеорологических величин. В настоящее время, наряду с сеткой с шагом 7 км, охватывающей европейскую часть России и прилегающие территории, оперативные численные прогнозы системы COSMO-Ru проводятся для Центрального, Приволжского и Южного федеральных округов (шаг сетки 2,2 км) и для района г. Сочи (шаг сетки 1,1 км). Отдельно стоит отметить расчетную область с шагом сетки 13,2 км, охватывающую значительную часть территории Евразии (за исключением Южной и Юго-Восточной Азии), а также прилегающие акватории Тихого и Северного Ледовитого океанов. Численные прогнозы системы COSMO-Ru проводятся ежедневно 4 раза для сроков наблюдений 00:00, 06:00, 12:00 и 18:00 UTC с автоматической визуализацией и рассылкой потребителям более 8000 метеорологических карт и около 1000 метеограмм ежедневно [5].

Результаты расчетов системы COSMO-Ru широко использовались для метеорологического обеспечения летней Универсиады 2013 г. в Казани и зимней Олимпиады 2014 г. в Сочи. Например, 16–17 февраля 2014 г. с помощью продукции системы COSMO-Ru был составлен качественный прогноз дальности видимости [9]. Система также применяется для решения многих научных и практических задач, таких как прогноз полей свежеснежного покрова [10], исследование турбулентного масштаба длины [11], прогноз полярных циклонов [12].

Кроме того, в рамках Консорциума разрабатываются версии COSMO-ART (*англ.* Aerosols and Reactive Trace gases) и COSMO-CLM. Первая моделирует перенос и взаимодействие в атмосфере химических веществ и аэрозолей, вторая – климатическая. С 2014 г. версии COSMO, COSMO-ART и COSMO-CLM совпадают, различаются только наборы внешних параметров.

Так, в качестве начальных и граничных условий использовались данные ERA-Interim (горизонтальный шаг сетки –  $0,7^\circ$ , шаг по времени – 6 ч) за 31 год (с 1985 по 2015 г.). Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации, такой временной промежуток позволяет оценить климатический режим выбранного региона. Меньший промежуток (например, 5–7 лет) нерепрезентативен из-за многолетней изменчивости и малого количества случаев с экстремальными скоростями ветра.

Расчет велся на трех доменах с постепенно уменьшающимися шагами сетки и областью расчетов (рис. 2). Первый домен с шагом сетки 13,2 км и обозначением EAS (*англ.* East Asia seas) включает акватории Охотского и Японского морей, а также прилегающие акватории Тихого океана. Такой выбор EAS обусловлен преобладающими траекториями синоптических циклонов, выходящих к восточному побережью о. Сахалин. Рассматриваемый регион близок к областям тропического циклогенеза, и тропические тайфуны зачастую регенерируют на полярном фронте. Кроме того, в холодный период года адвекция холодного воздуха с континента может приводить к активному циклогенезу.

Второй домен с шагом сетки 6,6 км обозначен как SOS (*англ.* Sakhalin – Okhotsk Sea). Основное уменьшение расчетной области происходит на акваториях Японского моря и Тихого океана. Однако из-за того, что архив метеорологических полей в дальнейшем планируется использовать для океанологических исследований, расчетная область охватывает всю территорию Охотского моря (включая Пенжинскую и Удскую губы) и часть акватории Японского моря (включая Сангарский пролив).

На области с наилучшим пространственным разрешением (шаг сетки – 2,2 км, обозначение – SAH от *англ.* Sakhalin) считались лишь случаи с максимальными скоростями ветра, и расчеты потребовали сравнительно

небольших затрат машинного времени. Поэтому, хотя область SAH уступает по размерам SOS, она охватывает весь о. Сахалин и значительную часть акватории Охотского моря. Это позволяет воспроизводить динамику наблюдавшихся циклонов внутри самой SAH.

Расчеты проводились на базе Главного вычислительного центра Росгидромета на высокопроизводительных кластерах SGIICE-X и PCK Торнадо. Стоит отметить, что вычисления требуют значительных затрат машинного времени. Так, расчеты по домену EAS на один год на 160 процессорных ядрах занимают ~ 24 ч, по домену SOS – примерно 56 ч. Результатами расчетов служат приземные поля температуры, давления, влажности, скорости и порывов ветра, потоков радиации и явного и скрытого тепла. Поля выводятся в формате NetCDF с шагом по времени в 1 ч.

Модель верифицировалась по данным наземной метеорологической сети за 2014 г. (результаты верификации для января-марта 2014 г. приведены на рис. 3, результаты верификации для остальных кварталов носят схожий характер). Метеостанции были сгруппированы по трем областям (см. рис. 3). Поскольку из-за особенностей подстилающей поверхности ближайший расчетный узел модели не всегда корректно характеризует положение ГМС, данные наблюдений сравнивались с модельными значениями в одном из ближайших узлов, наиболее подходящем для задач верификации.

В результате выполненной верификации можно сделать вывод о том, что модель адекватно воспроизводит данные наблюдений: значения среднеквадратических отклонений (СКО) невелики по сравнению с порядком изменчивости. Следует отметить, что при уменьшении рассматриваемой области, как правило, уменьшается СКО. Однако результаты моделирования вблизи отдельных метеостанций характеризуются весьма значительными ошибками. Вероятно, это связано с тем, что модель недостаточно точно описывает характеристики подстилающей поверхности на этих станциях.

Случаи экстремальных скоростей ветра ( $U_{\text{макс}}$ ) в районе Южно-Кириного месторождения отбирались с помощью автоматизированного метода «независимых штормов» [13], который исключает выборку двух и более случаев для одной синоптической ситуации. В год здесь наблюдались шесть-двенадцать случаев,

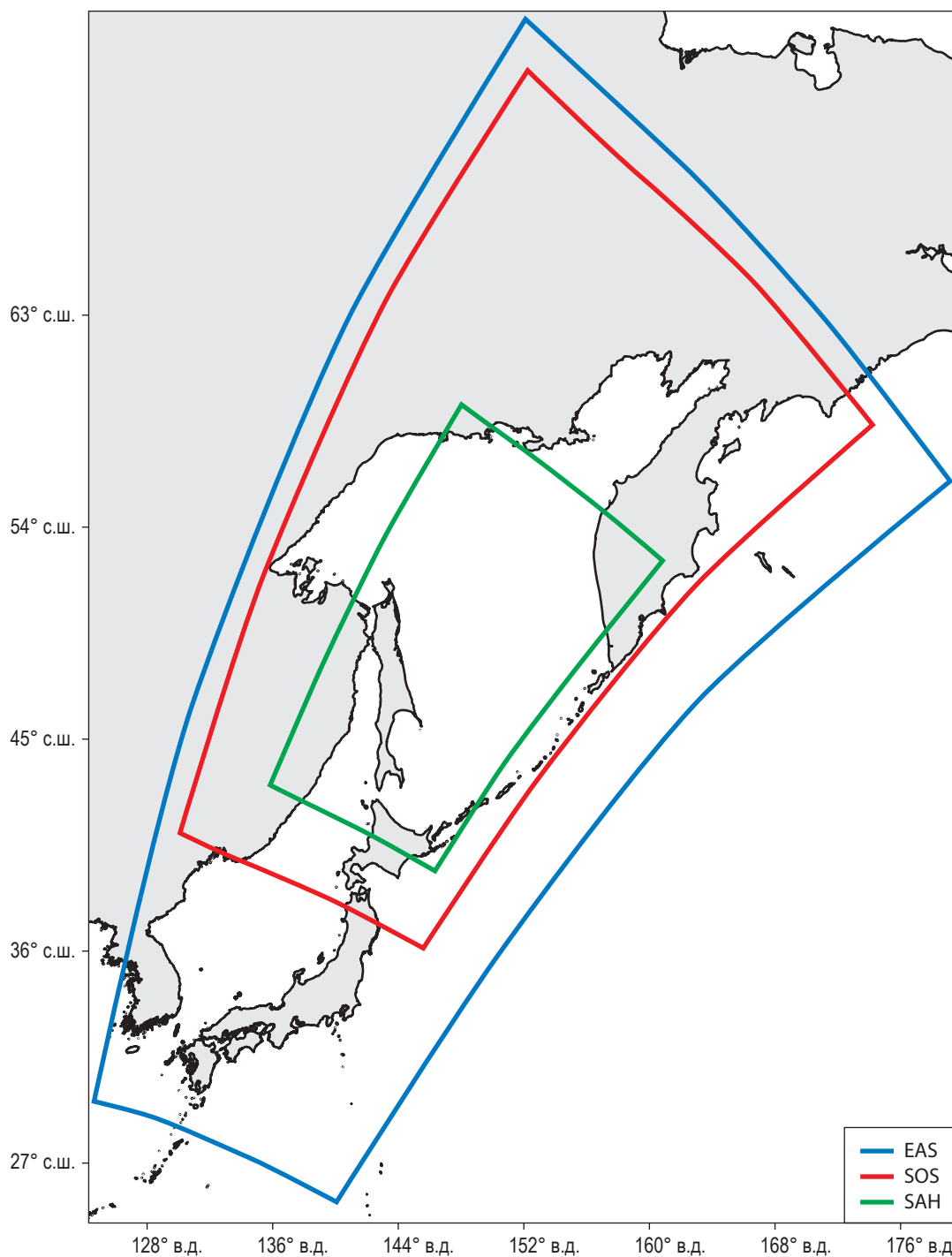


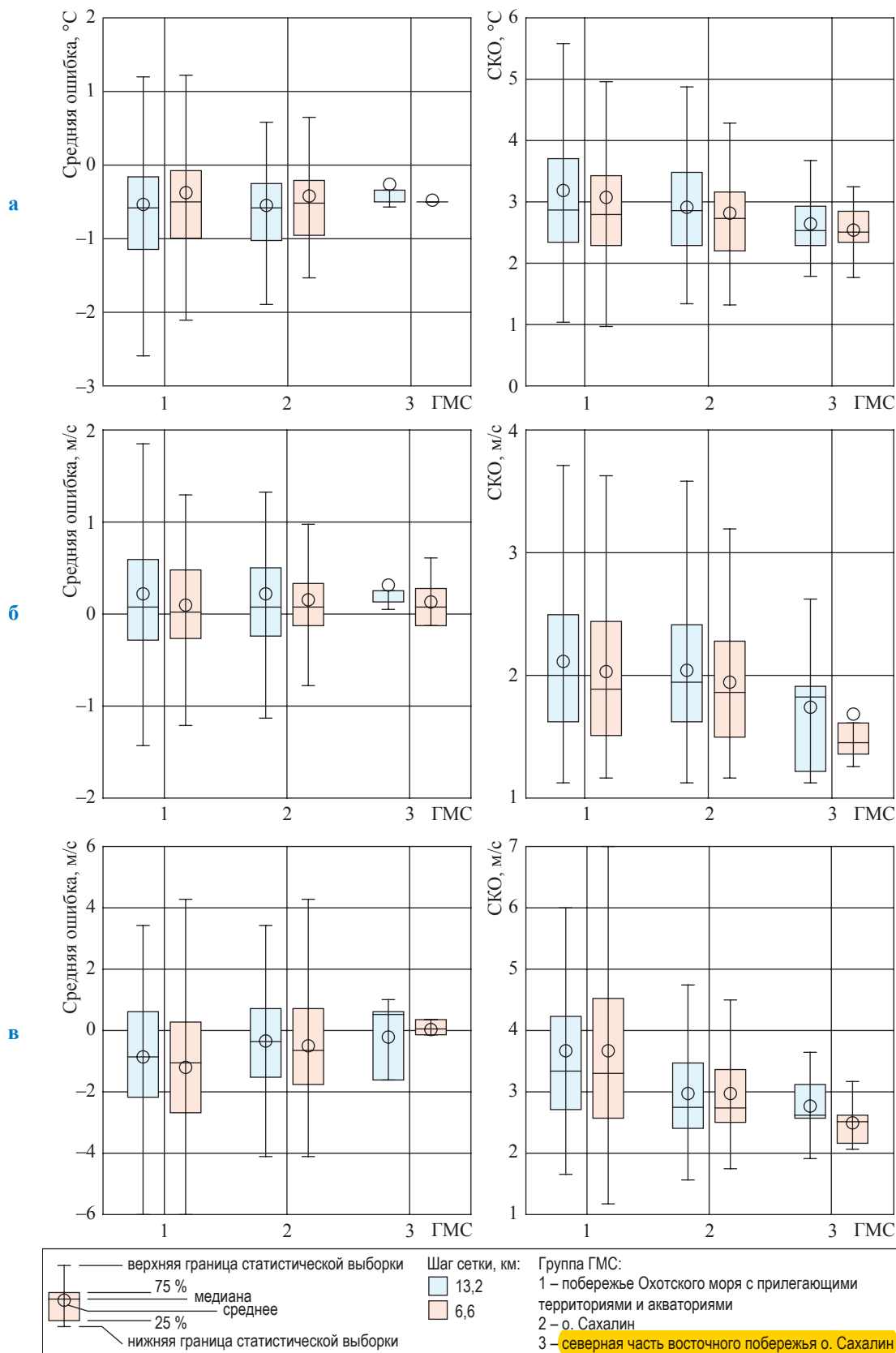
Рис. 2. Карта вложенных расчетных областей с различными горизонтальными шагами сетки

когда  $U_{\text{макс}} > 20$  м/с, и один-три случая, когда  $U_{\text{макс}} > 25$  м/с (рис. 4). Скорости ветра выше 30 м/с крайне редки: за весь период моделирования было отмечено только 3 подобных случая. При этом наблюдается статистически значимый тренд увеличения числа случаев, когда  $U_{\text{макс}} > 20$  м/с. При  $U_{\text{макс}} > 25$  м/с подобный тренд отсутствует.

Для моделирования с шагом сетки 2,2 км отобрано 10 случаев, когда в районе

месторождения  $U_{\text{макс}}$  превышала 27 м/с. При переходе от глобального реанализа к даунскейлингу значения скорости ветра в основном увеличиваются. Так, из 10 случаев применительно к домену EAS значения  $U_{\text{макс}}$  превышают соответствующие значения ERA-Interim на 1 м/с и более в 5 случаях, к SOS – в 7 случаях, к SAH – в 9 случаях.

Для всех доменов максимальное увеличение (почти на 10 м/с) значений скорости ветра



**Рис. 3.** Диаграммы размаха, построенные для сравнения результатов моделирования и данных наблюдений в I квартале 2014 г. на побережье Охотского моря и о. Сахалин (см. рис. 1): а – температура, °C; б – скорость ветра, м/с; в – суточные порывы ветра > 10 м/с

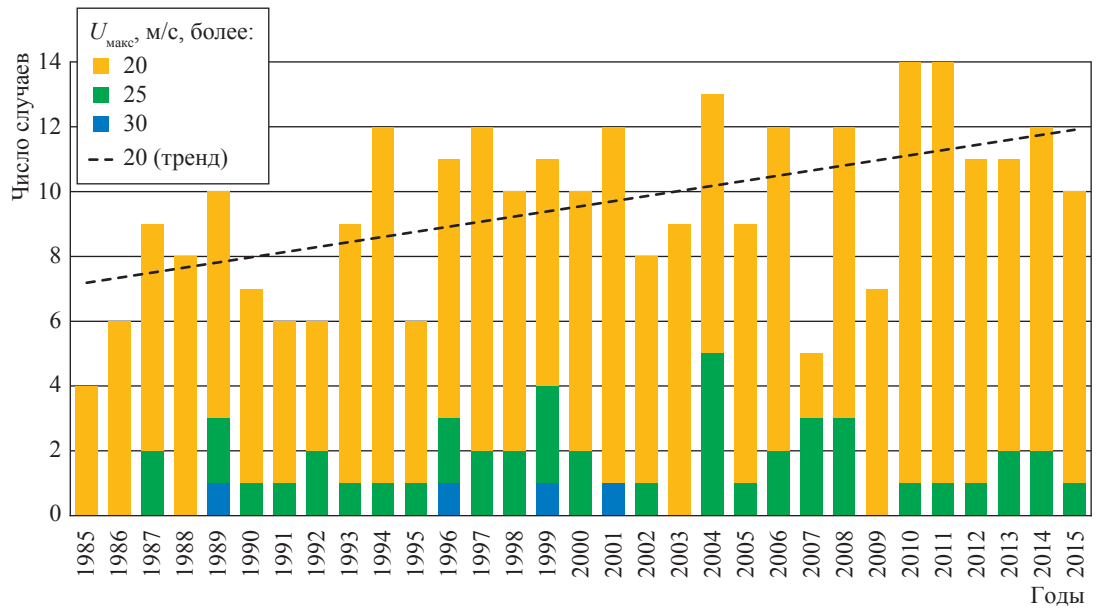


Рис. 4. Случаи экстремальных скоростей ветра в радиусе 75 км от Южно-Киринского месторождения, отобранные с использованием метода «независимых штормов»

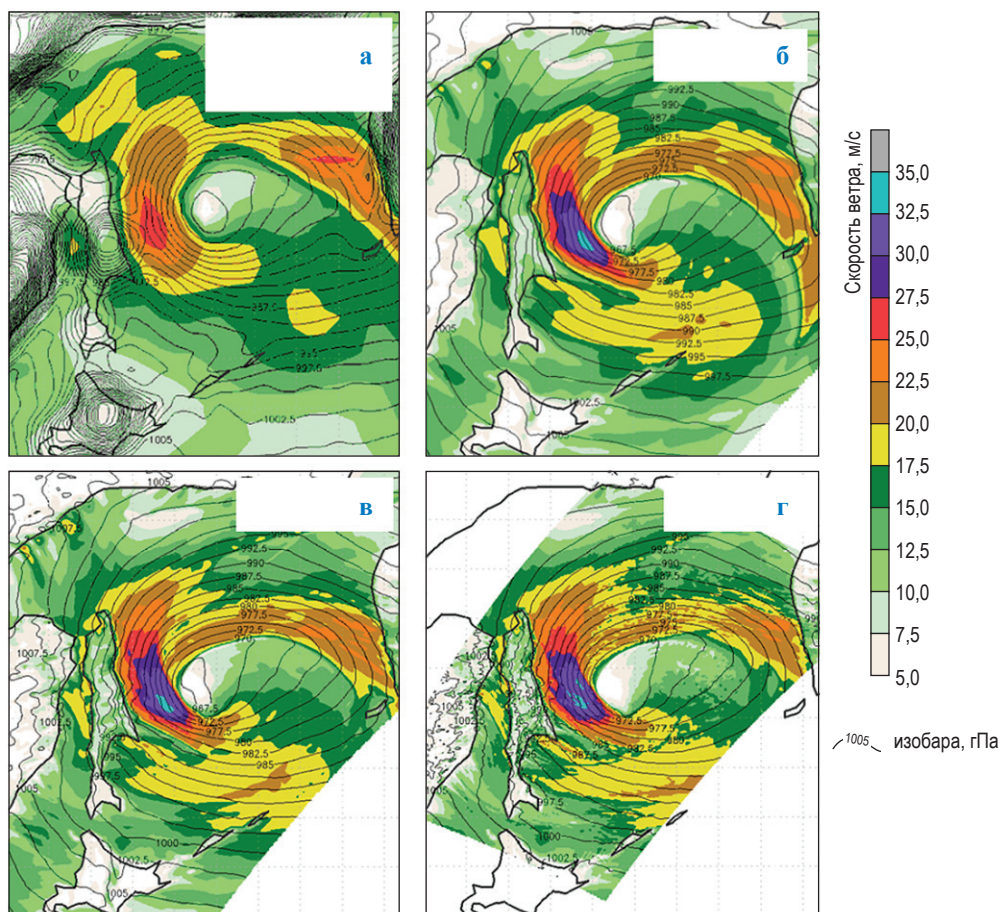


Рис. 5. Поля давления и скорости ветра в 23:00 UTC 14 февраля 1996 г.: а – ERA-Interim; б – EAS; в – SOS; г – SAH

зарегистрировано 14 февраля 1996 г. При этом (рис. 5) общая структура полей ветра и давления для разных модельных доменов очень похожа, но при уменьшении шага сетки модели увеличивается «пятнистость» (т.е. неоднородность) полей скорости ветра.

\*\*\*

Таким образом, впервые в Российской Федерации реализована технология создания детализированного многолетнего архива метеорологических полей, основанная на использовании мезомасштабной модели COSMO. Выполнено гидродинамическое моделирование детализированных полей метеорологических элементов на акватории Охотского моря за последние три десятилетия с помощью

мезомасштабной негидростатической климатической версии модели динамики атмосферы COSMO для сеток с шагами 13,2; 6,6 км и менее.

Верификация по данным станционных и судовых наблюдений позволила сделать вывод о том, что использованный метод даунскейлинга с применением модели COSMO адекватно воспроизводит метеорологический режим акватории Охотского моря. Показано, что повышение разрешения улучшает качество воспроизведения моделью полей основных метеорологических элементов, особенно при переходе к сетке с шагом 2,2 км.

Подробное описание методики даунскейлинга и полученных результатов предполагается опубликовать в отдельной статье.

## Список литературы

1. МIRONЮК С.Г. Геологические опасности осваиваемых месторождений восточного шельфа о. Сахалин: идентификация и признаки картографирования / С.Г. МIRONЮК // Вести газовой науки: Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2015. – № 2. – С. 113–117.
2. Dee D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee et al. // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2011. – V. 137. – № 656. – P. 553–597.
3. Storch H., von. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes / H. von Storch, H. Langenberg, F. Feser // *Monthly weather review*. – 2000. – V. 128. – № 10. – P. 3664–3673.
4. Anders I. Impacts of using spectral nudging on COSMO-CLM simulations of single Vb-events / I. Anders, M. Paumann, B. Chimani et al. // *3<sup>rd</sup> International Lund regional-scale climate modelling workshop proc.* – 2014. – P. 154–155.
5. Ривин Г.С. Система COSMO-Ru негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: второй этап реализации и развития / Г.С. Ривин, И.А. Розинкина, Р.М. Вильфанд и др. // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 6. – С. 58–70.
6. Doms G. Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Pt. I: Dynamics and numerics / G. Doms, U. Schaettler, M.A. Baldauf // *COSMO-Model 4.20*. – September 2011. – 147 p. – <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>
7. Baldauf M. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities / M. Baldauf, A. Seifert, J. Forstner et al. // *Monthly Weather Review*. – 2011. – № 139. – P. 3887–3905.
8. Ривин Г.С. Мезомасштабная модель COSMO-Ru7 и результаты ее оперативных испытаний / Г.С. Ривин, И.А. Розинкина, А.Н. Багров и др. // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов: инф. сб. Гидрометцентра России*. – 2012. – № 39. – С. 15–48. – <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb39/rivin.pdf>
9. Шатунова М.В. Прогноз видимости 16–18 февраля 2014 года в районе проведения Олимпийских игр Сочи-2014 с помощью модели с высоким пространственным разрешением COSMO-Ru1 / М.В. Шатунова, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 8. – С. 45–55.
10. Казакова Е.В. Система расчетов характеристик снежного покрова для формирования начальных полей при численном погодном моделировании (на примере COSMO-Ru) / Е.В. Казакова, М.М. Чумаков, И.А. Розинкина // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 5. – С. 20–32.



11. Перов В.Л. Реализация алгоритма турбулентного масштаба длины, основанного на методе смещения частиц воздуха под влиянием сил плавучести, в модуле пограничного слоя атмосферы модели COSMO-Ru Гидрометцентра России / В.Л. **Петров** // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2011. – № 346. – С. 76–86.
12. Никитин М.А. Идентификация полярных циклонов над акваторией Карского моря с помощью гидродинамического моделирования / М.А. Никитин, Г.С. Ривин, И.А. Розинкина и др. // Вести газовой науки: Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. – 2015. – № 2. – С. 106–112.
13. Cook N.J. Towards better estimation of wind speeds / N.J. Cook // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 1982. – № 9. – P. 295–**323**.

### Application of regional weather prediction system COSMO-Ru for hydrometeorological research within littoral and sublittoral of Okhotsk Sea: high-resolution fields of meteorological elements for 1985–2015

G.S. Rivin<sup>1,2\*</sup>, M.A. Nikitin<sup>1</sup>, I.A. Rozinkina<sup>1</sup>, A.V. Kislov<sup>2</sup>, M.I. Varentsov<sup>2</sup>, V.S. Platonov<sup>2</sup>, M.M. Chumakov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation (Hydrometcentre of Russia), Bld. 11-13, B. Predtechensky per., Moscow, 123242, Russian Federation

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Bld. 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

<sup>3</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd # 5537, Razvilka village, Leninsky district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

\* E-mail: Gdaly.rivin@mail.ru

**Abstract.** While planning and ensuring safe operation of facilities at the oil-gas fields in the Okhotsk Sea, one must use relevant hydrometeorological data. However, neither the results of terrestrial observations, nor the data of global reanalysis enable account of the mesoscale atmospheric processes, which can provoke dangerous hydrometeorological phenomena.

To acquire data which consider peculiarities of mesoscale circulation a downscaling procedure has been created. It was applied for calculations performed by a climatic version of the COSMO simulator of the atmosphere (in COSMO-Ru configuration). Using this procedure an archive of the detailed fields of the meteorological elements for 1985–2015 was composed. The named calculation was done for three spatial model domains with gradually decreasing grid pitches (13.2; 6.6 and 2.2 km). The domain with the grid pitch of 2.2 km, covering the whole territory of Sakhalin and the most part of Okhotsk Sea waters, was applied for simulation of the synoptic situations supposing extremal wind velocities.

Results of simulation were verified by data of the terrestrial meteorological network collected during 2014. Verification showed that the simulator adequately reproduces data of observations. It is important that if a grid pitch of a simulator diminishes, the standard deviation usually goes down.

The gained archive was applied for analysis of the extremal synoptic situations nearby the Yuzhno-Kirinskoye field. It was determined that there were 6–12 cases of wind velocities more than 20 m/s and 1–3 cases of wind velocities more than 25 m/s. Wind velocities of more than 30 m/s are quite rare. Only three cases of that kind were found during the total period of simulation (30 years). A probably significant trend for increase of a number of cases when wind velocity is higher than 20 m/s is revealed. There is no such a trend for velocities higher than 25 m/s. Improvement of resolution will improve quality of reproduction of the main fields of meteorological elements by the simulator, especially at transfer to a grid with a 2.2 km pitch.

**Keywords:** mesoscale simulation of climate, downscaling, method of nested grids, Okhotsk Sea, extremal wind velocity.

#### References

- MIRONYUK, S.G. Geological hazards of fields being developed at the eastern continental shelf of Sakhalin: identification and principals of mapping [Geologicheskiye opasnosti osvayvayemykh mestorozhdeniy vostochnogo shelfa o. Sakhalin: identifikatsiya i priznaki kartografirovaniya]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, no. 2 (22): Modern approach and promising technologies within the projects for development of oil-and-gas fields at the Russian continental shelf, pp. 113–117. ISSN 2306-8949. (Russ.).
- DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011, vol. 137, no. 656, pp. 553–597. ISSN 0035-9009.

3. STORCH H., von, H. LANGENBERG, F. FESER. A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Monthly Weather Review*. 2000, vol. 128, no. 10, pp. 3664–3673. ISSN 1520-0493.
4. ANDERS, I., M. PAUMANN, B. CHIMANI et al. Impacts of using spectral nudging on COSMO-CLM simulations of single Vb-events. In: *3<sup>rd</sup> International Lund regional-scale climate modelling workshop proceedings*. 2014, pp. 154–155.
5. RIVIN, G.S., I.A. ROZINKINA, R.M. VILFAND et al. Hydrometcentre of Russia COSMO-Ru system for nonhydrostatic mesoscale short-term weather forecasting: second stage of realization and development [Sistema COSMO-Ru negidrostaticheskogo mezomasshtabnogo kratkosrochnogo prognoza pogody Gidromettsentra Rossii: vtoroy etap realizatsii i razvitiya]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2015, no. 6, pp. 58–70. ISSN 0130-2906. (Russ.).
6. DOMS, G., U. SCHAEETTLER, M.A. BALDAUF. Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model. Pt. I: Dynamics and numerics. In: *COSMO-Model 4.20* [online]. September 2011. Available from: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>
7. BALDAUF, M., A. SEIFERT, J. FORSTNER et al. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. *Monthly Weather Review*. 2011, no. 139, pp. 3887–3905. ISSN 1520-0493.
8. RIVIN, G.S., I.A. ROZINKINA, A.N. BAGROV et al. Mesoscale COSMO-Ru7 simulator and results of its operational tests [Mezomasshtabnaya model COSMO-Ru7 i rezultaty eye operativnykh ispytaniy]. In: *Results of testing new and updated technologies, models and methods for hydrometeorological forecasting* [Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov]: informational collect. book [online]. 2012, no. 39, pp. 15–48. Available from: <http://method.meteorf.ru/publ/sb/sb39/rivin.pdf>. (Russ.).
9. SHATUNOVA, M.V., G.S. RIVIN, I.A. ROZINKINA. Forecast of visibility on February 16–18, 2014 in the area of the Sochi-2014 Olympic Games using COSMO-Ru1 simulator with high spatial resolution [Prognoz vidimosti 16–18 fevralya 2014 goda v rayone provedeniya Olimpiyskikh igr Sochi-2014 s pomoshchyu modeli s vysokim prostranstvennym razresheniyem COSMO-Ru1]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2015, no. 8, pp. 45–55. ISSN 0130-2906. (Russ.).
10. KAZAKOVA, Ye.V., M.M. CHUMAKOV, I.A. ROZINKINA. System for calculating parameters of snow cover to form initial fields at numerical weather simulation (on example of COSMO-Ru) [Sistema raschetov kharakteristik snezhnogo pokrova dlya formirovaniya nachalnykh poley pri chislennom pogodnom modelirovanii (na primere COSMO-Ru)]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2015, no. 5, pp. 20–32. ISSN 0130-2906. (Russ.).
11. PEROV, V.L. Realizing algorithm of turbulent length scale based on a method of air particles displacement under the influence of buoyancy lifts in a module of atmosphere boundary layer within the COSMO-Ru simulator of the Hydrometcentre of Russia [Realizatsiya algoritma turbulentnogo masshtaba dliny, osnovannogo na metode smeshcheniya chastits vozdukha pod vliyaniem sil plavuchesti, v module pogrannichnogo sloya atmosphyeri modeli COSMO-Ru Gidromettsentra Rossii]. *Proc. of Hydrometeorological Research Centre of Russian Federation*. 2011, no. 346, pp. 76–86. ISSN 0371-7089. (Russ.).
12. NIKITIN, M.A., G.S. RIVIN, I.A. ROZINKINA et al. Identification of polar cyclones above the Kara Sea waters using hydrodynamic modelling [Identifikatsiya polyarnykh tsiklonov nad akvatoriyey Karskogo moray s pomoshchyu gidrodinamicheskogo modelirovaniya]. *Vesti Gazovoy Nauki*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, no. 2 (22): Modern approach and promising technologies within the projects for development of oil-and-gas fields at the Russian continental shelf, pp. 106–112. ISSN 2306-8949. (Russ.).
13. COOK, N.J. Towards better estimation of wind speeds. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 1982, no. 9, pp. 295–323. ISSN 1567-7419.

