

РОЛЬ ДРЕЙФА ЛЬДА В ФОРМИРОВАНИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

канд. физ.-мат. наук М.Ю.КУЛАКОВ, д-р физ.-мат. наук А.П.МАКШТАС

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: mod@aari.ru

На основе результатов модельных расчетов с помощью модели циркуляции вод и льдов AARI-IOCM, анализа данных полей температуры приземного слоя воздуха и приземного давления из реанализа NCEP/NCAR выполнена оценка роли дрейфа льда в формировании ледяного покрова Северного Ледовитого океана в 2001–2012 гг. Получены прогностические оценки оптимального места организации будущей дрейфующей станции «Северный полюс-41».

Ключевые слова: *Северный Ледовитый океан, морской лед, дрейф, температура воздуха, динамико-термодинамическая модель.*

В 2010 г. были опубликованы работы [Векгуаев et al., 2010] и [Алексеев и др., 2010], в которых по результатам наблюдений на максимально возможном числе гидрометеорологических станций, расположенных к северу от 60°, был выполнен анализ термического режима приземного слоя воздуха от начала инструментальных наблюдений до 2009 г. и его связи с ледовитостью Северного Ледовитого океана (СЛО). В настоящей статье на основе разработанной в ААНИИ численной модели совместной циркуляции льдов и вод СЛО и данных реанализа NCEP/NCAR выполнен анализ изменений, происшедших в арктическом морском ледяном покрове за период 2001–2012 гг., и предложен один из возможных механизмов влияния динамических факторов на изменчивость массы и площади ледяного покрова СЛО в начале XXI в. В заключение приведены результаты модельных расчетов, направленных на выбор места организации будущей дрейфующей станции «Северный полюс-41».

Для исследования роли динамических факторов в формировании особенностей распределения льдов в СЛО был выполнен ряд численных экспериментов на модели совместной циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана AARI-IOCM [Кулаков и др., 2012a]. AARI-IOCM представляет собой результат объединения трех моделей: трехмерной бароклинной модели циркуляции вод, модели дрейфа ледяного покрова и термодинамической модели морского льда. Модель адаптирована к акватории СЛО и прилегающей акватории Атлантического океана и имеет пространственное разрешение 13,8 км. Размер сеточной области 440×395 точек. По вертикали разрешение переменное, расчет производится на 33 горизонтах. Для описания донной топографии и конфигурации береговой черты использован архив GEBCO. В качестве внешнего форсинга были использованы данные об атмосферном давлении на уровне моря и температуре воздуха на высоте 2 м для сроков 0, 6, 12 и 18 GMT из архива NCEP/NCAR, а также интерполированные на каждые сутки климатические среднемесячные значения балла общей облачности, относительной влажности воздуха, интенсивности твердых осадков и приходящей коротковолновой радиации.

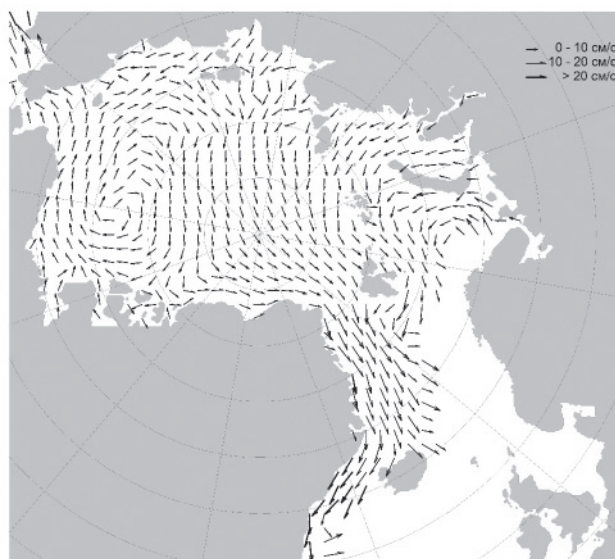


Рис. 1. Осредненное за период с 2001 по 2012 г. поле скоростей дрейфа льда в СЛО.

Пространственное разрешение всех упомянутых характеристик составляет $2,5 \times 2,5^\circ$. В качестве граничных условий были использованы среднемесячные среднемноголетние значения расходов 17 основных рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Температура и соленость воды из World Ocean Atlas (WOA05) для летнего периода были взяты в качестве начальных условий. Расчеты были проведены для периода с 15 сентября 2000 г. по 30 сентября 2012 г.

В предыдущих работах было показано, что при использовании описанных выше форсингов *AARI-IOCM* достаточно хорошо воспроизводит ледовые условия и циркуляцию вод в СЛО [Кулаков и др., 2012а, б; Кулаков, 2012]. На рис. 1 представлено среднее за период с 2001 по 2012 г. расчетное поле скорости дрейфа льда в СЛО. Для наглядности на рисунке представлен каждый десятый вектор сглаженного по квадратам 10×10 узлов сеточной области поля. Как видно из рисунка, полученная схема циркуляции льдов соответствует современным представлениям об основных закономерностях дрейфа в СЛО. Модель воспроизводит антициклонический круговорот в море Бофорта, ярко выраженный Трансполярный дрейф, берущий начало в Чукотском море, и интенсификацию скорости дрейфа в струе Восточно-Гренландского течения.

Однако наибольший интерес в рамках настоящего исследования представляет межгодовая изменчивость циркуляции льдов СЛО и ее роль в формировании особенностей ледяного покрова. Как показал анализ сезонной изменчивости ледовитости, для возникновения ее экстремальных значений в момент наибольшего очищения СЛО ото льда совершенно не обязательно наличие экстремума того же знака в момент максимального развития ледяного покрова, обычно наблюдаемого в апреле. По этой причине в работе будут исследованы процессы, происходящие в теплый период года, с мая по сентябрь. Для детального анализа особенностей дрейфа льда были выбраны годы, когда ледовитость СЛО в сентябре имела ярко выраженные экстремумы. Для анализа минимумов ледовитости были выбраны 2007 и 2012 гг., а для анализа максимумов – 2006 и 2009 гг.

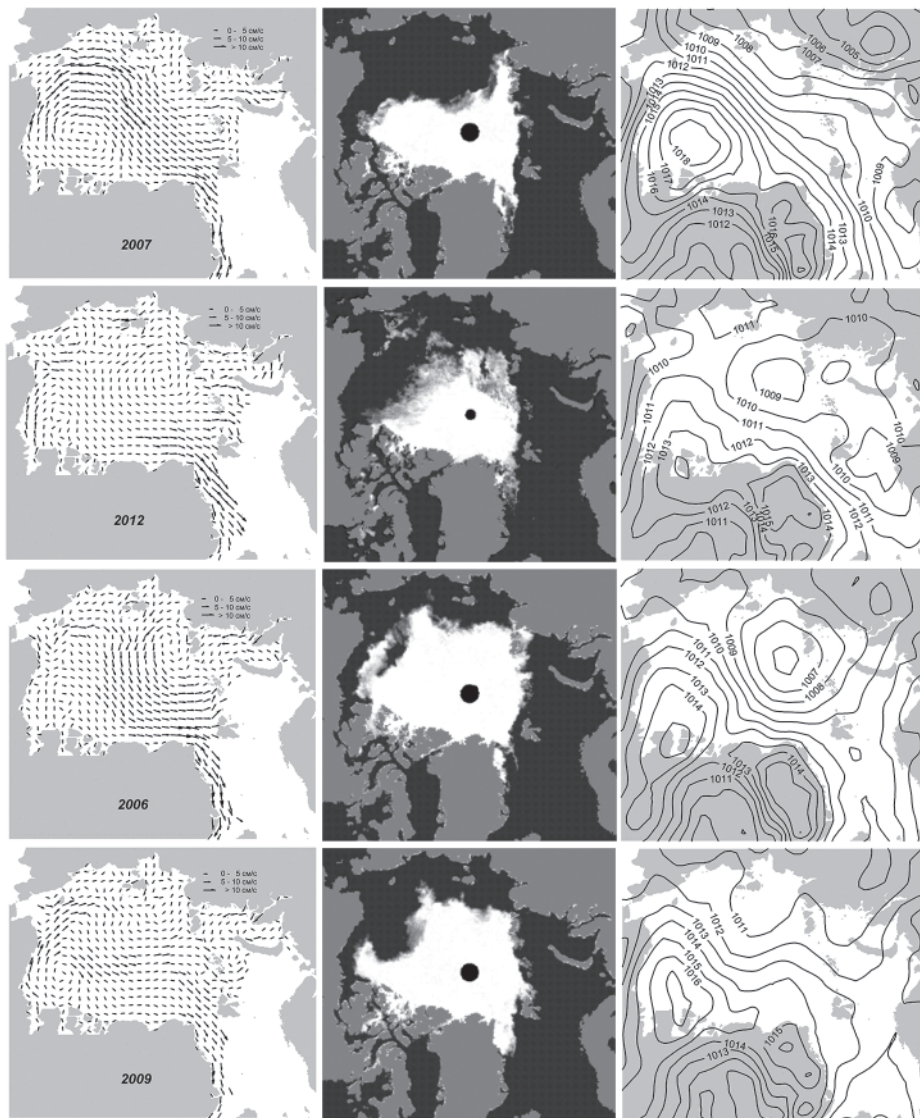


Рис. 2. Осредненные за май–сентябрь поля скоростей дрейфа льда (слева) и атмосферного давления (справа), а также сплоченности льда в сентябре по данным AMSR–E (<http://www.ijis.iarc.uaf.edu/cgi-bin/seaiice-monitor.cgi>) в центре. Годы приведены на рисунках в левом ряду.

Поля осредненных за май–сентябрь скоростей дрейфа льда и атмосферного давления, а также сплоченности льда в сентябре по данным AMSR–E для указанных годов представлены на рис. 2. На рисунке верхние два ряда карт соответствуют годам с минимальной ледовитостью летом, два нижних – максимальной. Анализ полей скорости дрейфа и ледовитости показывает, что выбранный период осреднения полей является репрезентативным, поскольку все особенности формы областей СЛЮ, за-

нятых ледяным покровом в конце периода таяния, можно объяснить особенностями дрейфа льда в соответствующем году.

Как видно из рисунка, характерными чертами циркуляции льда в 2007 г., обусловившими форму области, занимаемой ледяным покровом, были ярко выраженный антициклонический круговорот в Канадской котловине, интенсивный Транспольярный дрейф вдоль хребта Ломоносова и ответвление влево от него вдоль восточного побережья Северной Земли в море Лаптевых.

В 2012 г. поле скорости дрейфа, за исключением района, прилегающего к восточному побережью Гренландии, характеризовалось наименьшими значениями модуля скорости. Это нашло свое проявление в обширных областях ледяного покрова пониженной сплоченности на его границах. Антициклонический круговорот в Канадской котловине практически отсутствовал. При этом существовали два слабых циклонических круговорота: один к северу от моря Лаптевых и другой вокруг о. Врангеля. В обоих круговоротах до конца периода таяния сохранились небольшие массивы льда. При этом в круговороте к северу от моря Лаптевых лед практически примыкал к кромке основного массива. В круговороте вокруг о. Врангеля лед наблюдался в виде изолированного массива, остаточные форма льда в котором просуществовали в низких широтах до начала замерзания в октябре 2012 г.

Для 2006 г. характерной чертой циркуляции льдов был циклонический круговорот к северо-востоку от мыса Арктический. Вдоль его северной периферии проходил достаточно интенсивный Транспольярный перенос, который частично отклонялся к архипелагу Земля Франца-Иосифа. Антициклонический круговорот в Канадской котловине был развит слабо. Во всех арктических морях доминировал выносной дрейф, причем потоки льда из Восточно-Сибирского и Чукотского морей сходились в районе меридиана 160° в.д. и формировали хорошо выраженный язык, выступающий из основного массива к югу вдоль этого меридиана. Второй изолированный язык был сформирован в море Бофорта на южной периферии антициклонического круговорота толстыми льдами, перенесенными от побережья Канадского архипелага.

В 2009 г. антициклонический круговорот в Канадской котловине был развит сильнее, чем в 2006 г., а циклонический круговорот к северо-востоку от мыса Арктический слабее. Транспольярный перенос был ослаблен и направлен не вдоль хребта Ломоносова, а пересекал его вдоль меридиана 75° в.д., после чего разделялся на две ветви, одна из которых шла в Баренцево море, а другая в пролив Фрама. Наиболее выраженной чертой ледяного массива в этом году был язык льда в море Бофорта, в центре антициклонического круговорота.

Из рис. 2 хорошо видно, что основные особенности циркуляции льда в СЛО определяются соответствующими полями атмосферного давления. Использование этих полей для дальнейшего анализа имеет ряд преимуществ по сравнению с полями дрейфа льда. Во-первых, поля атмосферного давления базируются на данных наблюдений, а не моделирования и поэтому не содержат в себе какие-либо систематические ошибки. Во-вторых, это скалярные поля, что значительно облегчает анализ.

Наиболее яркой особенностью полей атмосферного давления в годы с минимальной ледовитостью (2007 и 2012 гг.) в отличие от годов с максимальной ледовитостью (2006 и 2009 гг.) является существенно больший градиент давления между о. Гренландия и архипелагом Шпицберген. Соответствует это и феноменологии исследуемого процесса. Действительно, пролив Фрама служит местом основного

выноса льда из СЛО, а интенсивность этого выноса определяется преобладающими местными ветрами. На значимость этого фактора указывается в работе [Stroeve et al., 2012]. По мнению авторов, высокое давление над Гренландией и центральным Арктическим бассейном и низкое над Сибирью способствуют ускорению таяния льда в Тихоокеанском секторе СЛО за счет поступления относительно теплого воздуха с материка, а также усилению выноса льда через пролив Фрама. Именно такая конфигурация барического поля способствовала возникновению минимума ледовитости СЛО в 2007 г. В данной работе исследована роль только динамического фактора, но за весь период с 2001 по 2012 г.

На рис. 3 представлены минимальная ледовитость СЛО по данным NSIDC и разница давления между о. Гренландия и архипелагом Шпицберген, осредненная за май–сентябрь каждого года. На рассматриваемом интервале времени (2001–2012 гг.) коэффициент корреляции между этими рядами равен $-0,77$. На этом же рисунке приведена кривая, построенная по уравнению множественной регрессии, связывающему ледовитость с разницей давления между Гренландией и Шпицберген и среднегодовой температурой:

$$L = 1,57 - 0,578P - 0,3T_{90-75}$$

где L – ледовитость (млн км²), δP – средняя за май–сентябрь разница давления между о. Гренландия и архипелагом Шпицберген (гПа), T_{90-75} – среднегодовая температура в широтном поясе 90–75° с.ш. (°C). Коэффициент корреляции ледовитости, рассчитанной по этой очень простой формуле, с наблюдаемой ледовитостью равен 0,79. Следует отметить и достаточно высокую корреляцию между температурой воздуха и градиентом давления (0,64), свидетельствующую о сложном взаимодействии полей температуры и атмосферного давления в северной полярной области, однако анализ этого взаимодействия лежит вне рамок данной работы.

Очень короткие ряды (12 реализаций) не позволяют использовать приведенную выше формулу для глобальных обобщений, но некоторые осторожные выводы в

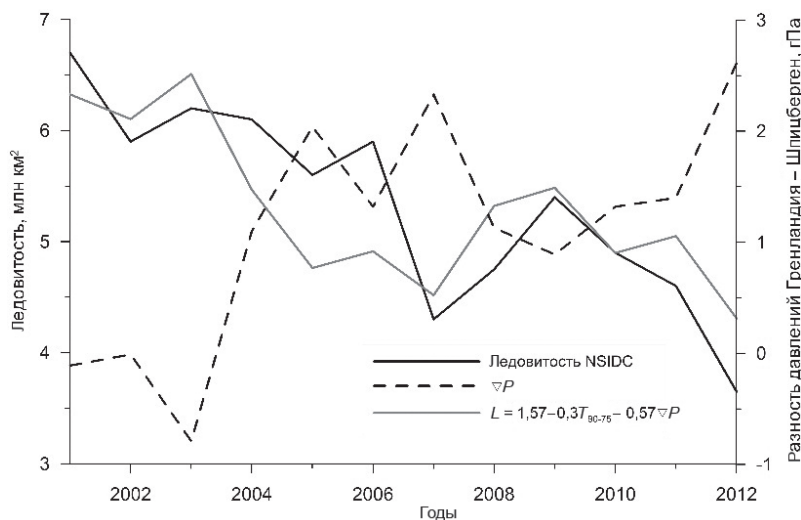


Рис. 3. Минимальная ледовитость СЛО по данным NSIDC и уравнению регрессии, а также средняя за май–сентябрь разница давления между Гренландией и Шпицберген.

краткосрочной перспективе на ее основании сделать можно. Абсолютный минимум ледовитости СЛО, зафиксированный в сентябре 2012 г., был достигнут при самой большой разнице давления между Гренландией и Шпицбергенем (2,61 гПа), но не самой высокой среднегодовой температуре воздуха ($-14,1$ °С). Наибольшая среднегодовая температура за рассматриваемый период была зафиксирована в 2010 ледовом году и составляла $-13,6$ °С. Если исходить из принципа консервативности современного состояния климатической системы, то при сочетании самой большой разницы давления между Гренландией и Шпицбергенем и самой высокой температуры из наблюдавшихся за рассматриваемый период, мы получаем возможное уменьшение ледовитости СЛО еще на 0,15 млн км², т.е. до величины порядка 3,5 млн км². Если допустить, что тенденция к потеплению продолжится, то можем предположить повышение температуры в 2013 г. относительно температуры в 2012 г. на величину стандартного отклонения рассматриваемого ряда, равную 0,61 °С, т.е. получим температуру равную $-13,5$ °С, практически равную достигнутой в 2010 г. Каких-либо достоверных свидетельств об усилении активности атмосферных процессов у нас нет, поэтому и нет оснований предполагать увеличение разницы давления между Гренландией и Шпицбергенем. В то же время, если задать разницу давления на уровне 2009 г. (0,89 гПа), то при температуре 2012 г. мы получим увеличение ледовитости на 1 млн км², т.е. порядка 4,6 млн км². Таким образом, исходя из вышеприведенных выкладок, минимальная ледовитость СЛО в 2013 г. может уменьшиться до 3,5 млн км², но, скорее всего, будет больше, чем в 2012 г.

Дрейф льда определяет не только форму и горизонтальные размеры ледяного массива, но и в значительной степени перераспределение толщин ледяного покрова на акватории СЛО. В недавно опубликованной работе [Laxon et al., 2013] были приведены данные обобщений спутниковых наблюдений Cryosat-2, свидетельствующие о значительном уменьшении толщины льда вдоль северных побережий о. Гренландия и Канадского архипелага (рис. 4 цвет. вклейки). Как видно из рисунка, результаты моделирования ледяного покрова, полученные с помощью модели *AARI-IOCM*, свидетельствуют о том же. Некоторое расхождение в толщинах льда между данными Cryosat-2 и модели может быть обусловлено как недостатками модели *AARI-IOCM* при описании реологии и термодинамики льда, так и погрешностью данных спутниковых наблюдений, обусловленной, например, некорректным учетом наличия на льду снежного покрова. Однако качественное совпадение можно констатировать.

Как известно, одной из главных целей численных экспериментов является выявление причин, обуславливающих сложные природные явления. Попробуем разобраться с причинами зафиксированного существенного уменьшения толщины льда вдоль северных побережий о. Гренландия и Канадского архипелага. На рис. 5 цвет. вклейки представлены средние за холодные периоды ледового года (октябрь 2006 г. – март 2007 г. и октябрь 2011 г. – март 2012 г.) поля скорости дрейфа льда. Анализ рисунка позволяет заметить существенное различие в схемах циркуляции. В 2006–2007 гг. наблюдался нажимной для побережий о. Гренландия и Канадского архипелага дрейф льда, в то время как в 2011–2012 гг. дрейф льда происходил преимущественно вдоль побережий. Результат такой разницы в направлении дрейфа проявился в интенсивности образования торосов у рассматриваемых побережий (рис. 5 в, г цвет. вклейки). Так, в 2007 г. непосредственно у побережья модельная концентрация торосов достигала 50 %, в то время как в 2012 г. не превышала 30 %

площади ледяного покрова. Согласно принятой в *AARI-IOCM* параметризации торосов постоянной толщиной 12 м это приводит к разнице в средней толщине льда порядка 2 м, что и было зафиксировано по данным Cryosat-2. Таким образом, выявленное резкое уменьшение толщины льда вдоль северных побережий о. Гренландия и Канадского архипелага является, в первую очередь, следствием межгодовой изменчивости циркуляции атмосферы, а не следствием потепления климата северной полярной области. Подтверждением данного вывода является и тот факт, что рассчитанные по модели толщины ровного льда в 2012 г. были не меньше, чем в 2007 г., а у побережья Гренландии даже больше (рис. 5 *д, е* цвет. вклейки).

Дрейф льда оказывает влияние и на перераспределение толщин ровного льда, но в меньшей степени. На рис. 6 представлено распределение толщин ровного льда на 11 сентября 2007 г. Если анализировать этот рисунок совместно со схемой дрейфа льда (рис. 2), то можно заметить, что наименьшие толщины приурочены к зоне интенсивного Трансполярного дрейфа, который переносит лед, сформированный в более низких широтах. В то же время наибольшие толщины наблюдаются в областях с малыми скоростями дрейфа и в зонах замкнутых круговоротов, где лед дрейфует продолжительное время в области с пониженными температурами воздуха.

В заключение приведем пример возможности использования результатов моделирования для решения прикладных задач. Уменьшение площади многолетнего ледяного покрова в Северном Ледовитом океане, происходящее в начале XXI в., с одной стороны, способствует организации круглогодичной навигации по трассе СМП и другой хозяйственной деятельности, с другой – обуславливает проблемы при организации дрейфующих станций «Северный полюс». Как известно, для нормального функционирования дрейфующей станции необходимо довольно много условий, главными из которых являются: наличие достаточно обширного ледяного

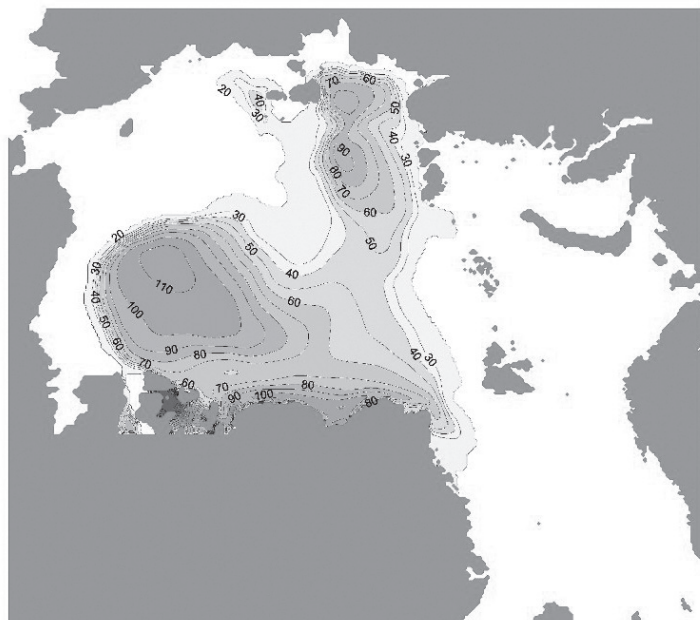


Рис. 6. Рассчитанное распределение толщин ровного льда (см) на 11 сентября 2007 г.

поля с толщиной ровного льда более 2 м, перспективы сохранности его по крайней мере в течение годового цикла работ на акватории СЛО и, желательно, дрейфа станции на минимальном удалении от территории Российской Федерации, обеспечивающем уменьшение логистических затрат. Для прогноза оптимального места организации осенью 2013 г. дрейфующей станции «Северный полюс-41» и определения положения дрейфующей станции «Северный полюс-40» на момент завершения ее работы был выполнен ряд численных экспериментов на модели *AARI-IOCM*.

Основной предпосылкой выполненных прогностических оценок является предположение, что циркуляционные процессы в атмосфере над северной полярной областью в 2013–2014 гг. будут подобны наблюдавшимся в первое десятилетие XXI века. Сценарии модельных экспериментов были построены следующим образом. Исходя из положения зоны многолетних льдов по данным последних наблюдений, были выбраны места возможной организации дрейфующей станции (рис. 7 цвет. вклейки).

Вычисления проводились на период с сентября 2000 г. по сентябрь 2012 г. При этом 20 сентября (обычное время организации и эвакуации дрейфующей станции) каждого модельного года для всех точек возможной организации дрейфующей станции рассчитывались траектории дрейфа льда до 20 сентября следующего года. Результаты вычислений для некоторых из расчетных точек представлены на рис. 8 цвет. вклейки. На рисунке кроме изображенных разными цветами траекторий дрейфа для каждого из вышеописанных периодов приведены средняя и минимальная продолжительности безопасного дрейфа, за окончание которого был принят момент пересечения параллели 85° с.ш. в направлении пролива Фрама.

Как видно из рисунка, при организации дрейфующей станций севернее 86° с.ш. велика вероятность быстрого выноса станции в пролив Фрама, разрушения льдины и последующей вынужденной эвакуации экспедиционного состава. Наибольшая продолжительность дрейфа, следуя нашим расчетам, была бы при организации станции в районе с координатами 84° с.ш., 180° в.д. В то же время при организации станции в указанном районе велика вероятность ее дрейфа в экономической зоне Канады, на максимальном удалении от территории Российской Федерации, в зоне сплоченных ледяных полей. Все это затруднило бы ее снабжение и эвакуацию в случае непредвиденных обстоятельств. Учитывая все вышесказанное, наиболее предпочтительными районами организации будущей станции, вероятно, являются районы с координатами 86° с.ш., 180° в.д. и 84° с.ш., 150° в.д., для которых прогнозируемая средняя продолжительность дрейфа близка к одному году. В этом случае местоположение станции в период дрейфа и в момент его окончания обеспечивает достаточно простые операции по ее снабжению и эвакуации.

Кроме того, для планирования операций по снабжению и эвакуации дрейфующей станции «Северный полюс-40» были произведены расчеты ее возможного местоположения 15 апреля 2013 г. (смена сезонного состава) и 20 сентября 2013 г. (плановая эвакуация экспедиционного состава). Сценарии расчетов были подобны описанным выше, однако за начало дрейфа принималось фактическое положение станции 10 февраля 2013 г. Результаты расчетов приведены на рис. 9 цвет. вклейки.

К моменту написания статьи СП-40 уже достигла своего положения на 15 апреля, и ее фактическое положение отмечено на рис. 9а. Видно, что станция движется несколько западнее наиболее вероятной траектории. Дрейф станции ближе всего к траекториям 2001 и 2006 гг. Расчет положения СП-40 на 20 сентября 2013 г. демонстри-

рует большой разброс результатов. Расстояние между крайними точками составляет порядка 1200 км, поскольку в апреле станция находится в районе с очень переменной динамикой (см. рис. 1). Она может быть вовлечена в антициклонический круговорот как в 2004, 2005, 2007, 2008 и 2011 гг. или начать двигаться в сторону пролива Фрама с достаточно большой скоростью, как это было 2001 и 2006 гг. В любом случае в период окончания дрейфа станция с большой долей вероятности будет находиться вблизи Канадского архипелага, а может и попасть в экономическую зону Канады.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по Госконтрактам № 16. 515.11.5074, № 16.420.12.0002 и Российско-германской программы «Система моря Лаптевых».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Балакин А.А.* Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 22–34.
- Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В.* AARI–IOCM – совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012а. № 2 (92). С. 6–18.
- Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В.* Модельные оценки чувствительности ледяного покрова Северного Ледовитого океана к изменениям форсингов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012б. № 3 (93). С. 66–74.
- Кулаков М.Ю.* О новом подходе к моделированию циркуляции вод арктических морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 55–62.
- Кулаков М.Ю., Макитас А.П., Шутилин С.В.* Верификация данных NCEP/NCAR по результатам наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 1 (95). С. 88–96.
- Bekryev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A.* Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming // J. Climate. 2010. Vol. 23. P. 3888–3906.
- Laxon S.W., Giles K.A., Ridout A.L., Wingham D.J., Willatt R., Cullen R., Kwok R., Schweiger A., Zhang J., Haas C., Hendricks S., Krishfield R., Kurtz N., Farrell S., Davidson M.* CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 40. doi:10.1002/grl.50193
- Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P.* The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis // Clim. Chang. 2012. Vol. 110 (3–4). P. 1005–1027.

M.YU.KULAKOV, A.P.MAKSHTAS

THE ROLE OF ICE DRIFT IN FORMATION OF SEA ICE COVER IN THE ARCTIC OCEAN AT THE BEGINNING OF XXI CENTURE

Based on the results of numerical experiments with couple sea ice- ocean model AARI-IOCM and data of surface air temperature and sea level pressure fields from NCEP/NCAR reanalysis the assessment of the role of ice drift in formation of sea ice cover peculiarities in the Arctic Ocean during 2001–2012 years is performed. Prognostic evaluations of optimal positions for organization of future drifting station «North Pole-41» are presented.

Keywords: Arctic Ocean, sea ice, drift, air temperature, dynamic-thermodynamic model.