

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДРЕЙФА ЛЬДА ДЛЯ УСЛОВИЙ ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА САХАЛИНА

А.А. Богдановский, С.И. Рыбалко, И.А. Аршинов

АННОТАЦИЯ

Приводится краткое описание ледовых условий Охотского моря, выполнен обзор, рассмотрены характеристики и особенности дрейфа льда в районе восточного шельфа о. Сахалин. Предложена параметрическая модель дрейфа льда. Проведена параметризация модели применительно к условиям восточного шельфа о. Сахалин. Выполнена верификация модели по доступным данным буйковых наблюдений в зимний период.

ВВЕДЕНИЕ

Для целей моделирования потенциальных разливов нефти в ледовых условиях возникла необходимость разработки модели дрейфа льда для района восточного шельфа о. Сахалин.

Необходимыми требованиями к разрабатываемой модели были учет сплоченности ледового поля, приводного ветра, морских течений, локальных особенностей прибрежной зоны и простота реализации модели.

ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА

Охотское море

Продолжительная зима с сильными морозами приводит к сильному выхолаживанию морской поверхности, сопровождающемуся интенсивным льдообразованием почти во всех районах Охотского моря. Льды Охотского моря имеют исключительно местное происхождение. Здесь встречаются как неподвижные льды, так и плавучие, которые представляют собой наиболее распространенную форму льдов моря.

Средняя продолжительность ледового периода в северо-западной части Охотского моря составляет 260 суток, в северных районах и у побережья о. Сахалин — 190—200, а на юге — 110—120 суток в год. Максимальная продолжительность ледового периода достигает 290 суток.

В наиболее суровые зимы ледяной покров занимает до 99% площади всей акватории моря, а в мягкие — 65%.

Льдообразование обычно начинается в ноябре в северо-западной части моря. Ледяной покров постепенно распространяется к югу вдоль западного и восточного побережий и появляется в открытой части моря. В декабре в заливах и бухтах образуется сплошной неподвижный береговой припай. В январе и феврале

ледяные поля занимают всю северо-западную и среднюю части моря. Дрейфующий лед достигает большой сплоченности и под влиянием течений и ветров подвергается сильному сжатию и торошению. Наибольшее распространение на юг, юго-восток льды получают в феврале и марте. С апреля по июнь происходит разрушение и таяние ледяного покрова. В северо-западной части моря лед сохраняется до июля. Толщина льда (без учета торошения) в прибрежных и мелководных районах в декабре—январе достигает 40—50 см, в открытом море (в средние по суровости зимы) — 40—70 см. Максимальные величины толщины льда (90—160 см) наблюдаются в суровые зимы в Сахалинском заливе и в районе моря на северо-восток от м. Елизаветы (северный Сахалин). Высота торосов в открытом море не превышает 1 м, а в отдельных заливах — 1.5—3.0 м (Плотников и др., 2000).

Восточное побережье Сахалина

Самое первое появление льда в северной части морской акватории восточного шельфа Сахалина по спутниковым данным отмечено 29 ноября (1974, 1978, 1979, 1986, 1989 гг.), самое позднее — 27 декабря (1980 г.). Самая ранняя дата появления льда у побережья — 13 ноября, поздняя — 18 декабря.

Первый лед в течение непродолжительного времени неустойчив, занимает малую площадь и может быть быстро унесен в открытую часть моря. Устойчивое появление льда приходится на 1 декаду декабря.

Окончательное очищение моря ото льда по данным береговых станций происходит, в среднем, во 2 декаде июня. В течение зимы ледовые условия на шельфе восточного Сахалина весьма суровые. Сплоченность льда колеблется от 5 до 10 баллов. С декабря по апрель преобладает лед сплоченностью 8—10 баллов, в ноябре и мае—июне — 5—6 баллов.

Средняя за ледовый период толщина ровного льда составляет $1,09 \pm 0,21$ м, максимальная измеренная величина достигает 2,01 м.

В течение зимы преобладающей формой льда являются ледяные поля, их разрушение происходит только в середине апреля, с середины мая преобладает битый лед.

Преобладающая торосистость льда в течение зимы 2—4 балла. Средняя высота торосов изменяется от 1,1 м в феврале до 1,8 м в апреле. Максимальная высота торосов достигает 5,4 м (Астафьев и др., 1997).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕЙФА ЛЬДА

Инструментальные наблюдения за дрейфом льда на восточном шельфе о. Сахалин впервые были произведены в 1972 г. с берега при помощи волномера-перспектометра. В дальнейшем для измерения скоростей дрейфа льда стали привлекать данные аэрофотосъемки, дистанционного зондирования из космоса с помощью спутника РЕСУРС и наблюдений с береговых радиолокационных станций (Астафьев и др., 1997; Покрашенко и др., 1987), данные автономных буев ARGOS (Астафьев и др., 1997).

На основе данных о дрейфе льда в Охотском море были получены расчетные зависимости для дрейфа льда и смещения кромок (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 1998). Численные расчеты дрейфа льда (Якунин, 1979) за период 1956—1960 гг. позволили получить картину для моря в целом (рис. 1).

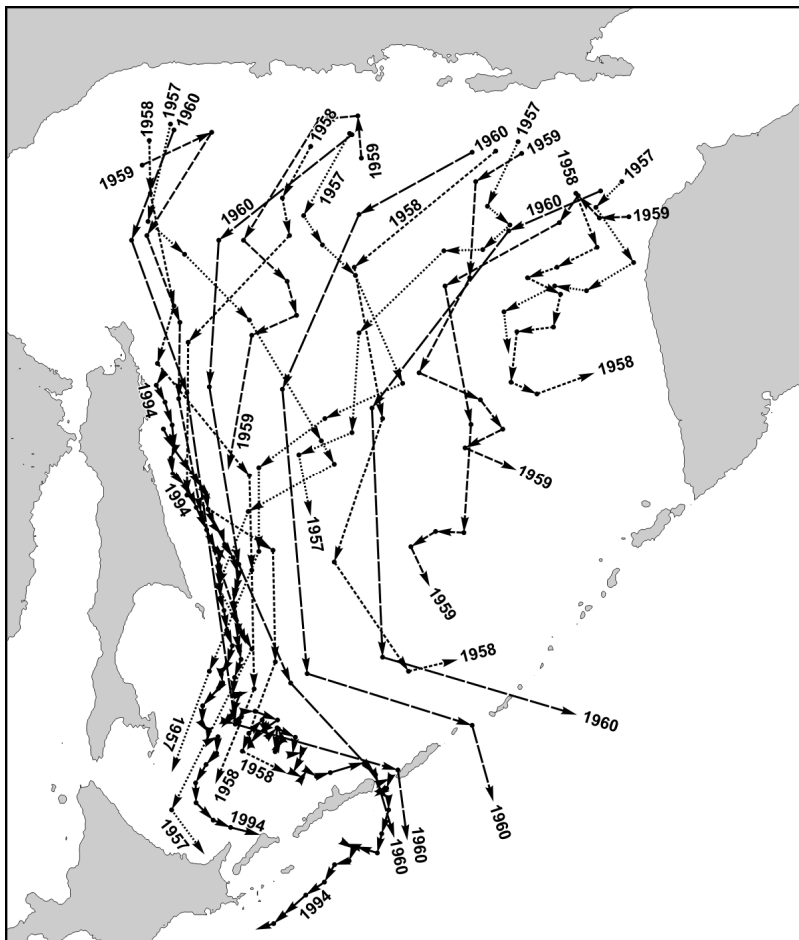


Рисунок 1. Схемы расчетного дрейфа льда 1957—1960 г.г. (Якунин, 1979) и траектория движения двух буев ARGOS в 1994 г. на льдинах (Астафьев и др., 1997)

По данным спутниковых наблюдений за перемещением фиксированных льдин за период с 1985 по 1992 гг. получены оценки скоростей генерального дрейфа льда на шельфе о. Сахалин в различные месяцы (табл. 1) (Астафьев и др., 1997).

Наибольшие скорости генерального дрейфа льда на восточном побережье Сахалина наблюдаются в январе—феврале (0,3 м/с), что обусловлено действием сильных ветров северных румбов и малой массой отдельных льдин. Генеральное направление дрейфа — юго-юго-восток. В марте—апреле направление ветров становится неустойчивым в связи с перестройкой воздушных потоков на летний муссон. Скорости дрейфа льда уменьшаются ввиду увеличения толщины льдов. Дрейф льда с севера на юг замедляется.

Наибольшие скорости генерального дрейфа льда наблюдаются в период максимального развития ледяного покрова в январе—феврале и могут достигать 1 м/с (Астафьев и др., 1997). Наибольшие мгновенные скорости дрейфа льда могут превышать 1,5 м/с.

Таблица 1. Экстремальные и среднемесячные значения скорости генерального дрейфа льда на северо-восточном шельфе о-ва Сахалин

Месяц	Скорость дрейфа льда, м/с		
	средняя	максимальная	минимальная
январь	0,31	1,10	0,09
февраль	0,31	0,55	0,08
март	0,19	0,46	0,03
апрель	0,12	0,14	0,06

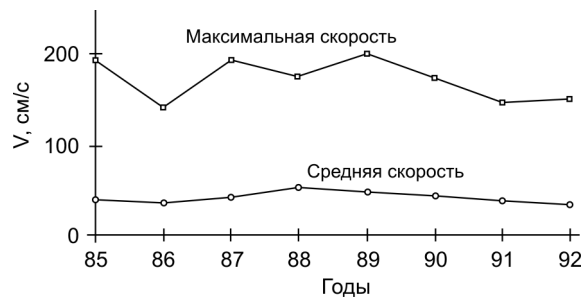


Рисунок 2. Межгодовая изменчивость среднегодовых и максимальных скоростей дрейфа льда (Астафьев и др., 1999)

Анализ среднегодовых и максимальных значений скорости по годам показывает, что генеральный дрейф льда вдоль восточного побережья о. Сахалин не претерпевает значительных межгодовых изменений (рис. 2).

Проведенный в январе—феврале 1994 г. эксперимент с автономными буйами ARGOS подтвердил полученные оценки дрейфа льда вдоль восточного побережья о. Сахалин (Астафьев и др., 1997).

Два буйа, установленные 9 января 1994 г. мористее зал. Пильтун и 11 января 1994 г. мористее зал. Чайво, дрейфовали несколько недель, периодически передавая свои координаты. Схема дрейфа буйев представлена на рис. 1.

Первый буй проследовал на юг вдоль восточного побережья о. Сахалин со средней скоростью 31,6 км/сут. (0,36 м/с), максимальной — 56 км/сут. (0,65 м/с). В южной части Охотского моря буй прошел по западной периферии циклонического круговорота с координатами центра 45,5° с.ш., 145,5° в.д., где наблюдается стационарная зона нарушения сплоченности льда. Второй буй также проследовал на юг вдоль восточного побережья о. Сахалин несколько восточнее первого буйа со средней скоростью 25,6 км/сут. (0,30 м/с) и максимальной — 64 км/сут. (0,74 м/с). В южной части Охотского моря буй попал в стационарную зону нарушения сплоченности льда с антициклоническим круговоротом с координатами центра 46,5° с.ш., 146,0° в.д. Буй находился в круговороте 17 суток, средняя скорость дрейфа буйа в этот период составила 21 км/сут. (0,24 м/с), максимальная — 48 км/сут. (0,56 м/с).

Приливной дрейф

В прибрежной зоне в изменчивость дрейфа льда существенный вклад вносят сильные приливные течения, ориентированные вдоль линии берега. На основе анализа данных наблюдений за дрейфом льдин с помощью радиолокационных станций (РЛС) (Shevchenko *et al.*, 1999; Покрашенко и др., 1987) установлено, что форма приливных эллипсов для дрейфа льда и течений имеет идентичный характер. Большие оси развернуты вдоль берега, что характерно для эллипсов течений на небольших расстояниях от берега, направление обхода вектора в приливном цикле во всех случаях по часовой стрелке. Однако отмечаются некоторые различия: эллипсы дрейфа льда более сжаты, что обусловлено более сильным влиянием бокового трения на дрейф, чем на течения. В целом, различия относительно невелики и относятся преимущественно к зональной (поперечной к берегу) компоненте дрейфа. Амплитуды скорости и значения фаз меридиональных компонент основных суточных приливных волн дрейфа льда и течений достаточно близки.

Максимальное перемещение льдин под влиянием приливных течений в течение суток по результатам анализа скоростей дрейфа за 1993 г. составило 22 км как в северном, так и в южном направлении. В годы экстремальных приливов для района постановки платформы «Моликпак» (в 16 км от берега на траверзе южной части зал. Пильтун) максимальное перемещение отдельных льдин может достигать 25 км в сутки. На участке шельфа к югу от зал. Чайво скорости приливного дрейфа льда резко уменьшаются.

Непериодическая компонента дрейфа

По данным наблюдений на РЛС Одопту, Комрво получены скорости дрейфа непериодической компоненты льда (табл. 2) (Тамбовский и др., 1999). Для расчета из наблюдений вычиталась предвычисленная приливная компонента. Продолжительность использованных наблюдений для различных месяцев составила от 6 (февраль) до 9 (апрель) лет.

Непериодическая компонента дрейфа льда вдоль всего восточного побережья о. Сахалин имеет идентичный характер с практически одинаковыми сезонными вариациями. В январе—феврале абсолютно доминирует дрейф на юг, его повторяемость составляет около 90%, средняя скорость на преобладающих направлениях составляет 30—40 см/с. В марте—апреле общая доля дрейфа южных румбов уменьшается до 65—70%, причем на РЛС Одопту повторяемость южного и юго-восточного направления практически одинакова, средние скорости уменьшаются до 15—25 см/с. Примерно такие же характерные скорости наблюдаются и в мае—июне, здесь доля южных направлений уменьшается до 45—50%, повторяемость дрейфа в северном направлении составляет 30—40%. Поскольку повторяемость южных ветров составляет в этот период около 30%, а северных около 15%, наиболее вероятная причина дрейфа льда в южном направлении — влияние постоянного Восточно-Сахалинского течения (Тамбовский и др., 1999).

Для южного и юго-восточного направлений величина скорости непериодической составляющей дрейфа льда часто превышает значение 100 см/с (максимальные скорости достигают 120—130 см/с). Для других направлений дрейфа льда столь высокие скорости не характерны.

Таблица 2. Средние / максимальные скорости непривливно дрейфа (см/с)

Месяц	Румбы							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
РЛС Одопту								
февраль	16,4 / 62,2	11,6 / 42,5	17,2 / 56,9	36,3 / 133,4	37,5 / 129,8	13,9 / 48,6	11,6 / 46,6	13,6 / 61,1
март	17,5 / 118,9	9,7 / 61,3	9,1 / 40,2	20,1 / 91,9	29,2 / 127,8	16 / 105,6	9,4 / 35,3	12,5 / 51,8
апрель	19,5 / 80,0	11,1 / 46,6	12,2 / 55,4	18,4 / 115,6	23,5 / 121,9	12,2 / 66	11,9 / 48,4	13,9 / 66,6
май	22,2 / 84,6	12,8 / 55,8	10,5 / 49,1	16,4 / 74,5	26,2 / 118,5	12,5 / 56,4	10,0 / 28,2	15,8 / 67,1
РЛС Комрво								
февраль	17,5 / 29,3	11,6 / 17,5	4,1 / 4,1	37,6 / 85,5	44,7 / 125,6	8,5 / 34,7	4,6 / 6,9	13,5 / 25,8
март	22,3 / 54,0	14,4 / 27,7	17,8 / 32,2	29,8 / 115,7	41,3 / 116,8	8,3 / 18,3	7,0 / 18,8	16,9 / 55,4
апрель	29,2 / 70,1	8,2 / 14,3	3,4 / 3,4	21,8 / 64,7	28 / 85,9	11,8 / 22,3	4,8 / 7,7	17,5 / 65,1
май	26,8 / 80,1	12,6 / 24,9	14,9 / 41,5	19,6 / 56,1	33,5 / 118,2	19,9 / 39,6	11,9 / 28,2	18,2 / 73,5

Таким образом, основными иницирующими факторами дрейфа льда на восточном шельфе о. Сахалин являются постоянное Восточно-Сахалинское течение, входящее в общую схему циркуляции Охотского моря, и зимний муссон, характеризующийся устойчивыми северо-западными ветрами. Приливо-отливные течения и сильные ветры южных румбов при прохождении циклонов усложняют общую картину дрейфа, но не влияют на характер генерального дрейфа.

МОДЕЛЬ ДРЕЙФА ЛЬДА

Основное уравнение

Для расчета скорости и направления переноса льда использовалась упрощенная формула скорости дрейфа льда, учитывающая факторы действия ветра, течений и характеристик сплоченности льда на дрейф. Проведенная параметризация коэффициентов влияния на основе данных инструментальных наблюдений в районе северо-восточного шельфа о. Сахалин позволила получить статистически значимые результаты сходимости расчетных траекторий движения льда с наблюдаемыми.

Комплексный вектор скорости дрейфа льдины в условиях различной сплоченности имеет вид:

$$\vec{I} = k_e k_{mw} k_{sw} \vec{W} + k_{mc} k_{sc} \vec{C}, \quad (1)$$

где k_e — коэффициент, учитывающий влияние локальных особенностей на ветровой дрейф льда;

k_{mw} — коэффициент учета влияния скорости ветра;

k_{sw} — коэффициент учета влияния сплоченности льда на ветровой дрейф льда;

\vec{W} — вектор приводного ветра;

k_{mc} — коэффициент учета влияния скорости подледных течений;

k_{sc} — коэффициент учета влияния сплоченности льда на дрейф льда благодаря течениям;

\vec{C} — вектор подледного морского течения.

Для зоны припайного льда скорость дрейфа принимается равной нулю ($|\vec{I}| = 0$), процессы отрыва или разрушения припайной зоны не рассматриваются.

В случаях когда льдина выходит на границу припайного льда, её дальнейший перенос в сторону берега не происходит. Однако в случае смены направления расчетного дрейфа от припая льдина начинает свое движение вновь.

Формула (1) не учитывает в полной мере приливной дрейф льда. Однако следует отметить, что при моделировании дрейфа льда на длительный период масштабы приливного дрейфа элиминируются масштабами переноса льда под действием влияния ветра и непериодической компоненты течений. Учет силы Кориолиса производится косвенно в параметрическом коэффициенте k_e .

Влияние ветра на дрейф льда

Анализ влияния ветра на дрейф льда проводился на основе данных скорости и направления ветра, полученных на РЛС восточного побережья о. Сахалин: Левенштерна, Одопту и Комрво (Тамбовский и др., 1999; Покрашенко и др., 1987).

Характер взаимосвязи между ветром и дрейфом льда определялся на основе синхронных векторных рядов ветра и непериодической компоненты дрейфа льда (ряды дрейфа очищены от приливной составляющей и сглажены для подавления высокочастотных осцилляций).

В общем случае, влияние ветра на дрейф льда носит нелинейный характер и зависит от скорости ветра; характеристик льда (толщина, сплоченность, торосистость); орографических особенностей береговой линии, оказывающей значительное влияние на дрейф в прибрежной зоне. Поэтому при определении коэффициентов ветрового дрейфа необходимо учитывать влияние всех перечисленных факторов, в совокупности определяющих результирующий ветровой дрейф льда.

Влияние локальных особенностей в прибрежной области

Вследствие особенностей орографии восточного побережья о. Сахалин меридиональная компонента дрейфа льда в прибрежной зоне лишь в малой степени испытывает влияние береговой линии, которая может препятствовать реакции льдов на воздействие ветра, направленного в сторону берега. Результаты исследований (Shevchenko *et al.*, 1999) показывают, что реакция дрейфа льда на восточном шельфе о. Сахалин носит достаточно сложный, не изотропный характер.

Определение влияния локальных условий, формирующих характерные особенности дрейфа льда в прибрежной зоне восточного побережья Сахалина, проводилось при помощи расчета матрицы A , соответствующей преобразованию:

$$(u, v) = A \cdot (w_u, w_v) + (e_u, e_v), \quad (2)$$

где: (u, v) — набор векторов непериодической компоненты дрейфа льда;

(w_u, w_v) — синхронный набор векторов скорости ветра;

(e_u, e_v) — остаточные вариации дрейфа, которые не удается описать влиянием ветра при помощи линейного преобразования с матрицей A с элементами $(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22})$.

Коэффициент a_{11} отвечает реакции зональной компоненты дрейфа на аналогичную составляющую ветра, a_{22} имеет тот же смысл для проекций на меридиан, два других элемента отражают влияние составляющих ветра на противоположные компоненты дрейфа: a_{12} — соответствует отклику зональной компоненты дрейфа на меридиональную компоненту ветра, a_{21} — наоборот, меридионального дрейфа на зональную компоненту ветра.

Расчет элементов матрицы проводился методом наименьших квадратов. Результаты расчетов оказались достаточно устойчивыми, особенно это относится к коэффициенту a_{22} — его значения составляют около 3. Элемент матрицы a_{11} колебался в пределах 1,0—1,5, a_{12} изменяется от -0,2 до -0,6. Наименее устойчивым оказался коэффициент a_{21} , отражающий влияние зональной компоненты ветра на меридиональный дрейф — его значения варьировали от -0,5 до -2,5. Отрицательные значения этого элемента указывают, что западный ветер усиливает движение льда в южном направлении, а восточный — в северном.

Соответствующее рассчитанной матрице преобразование можно характеризовать эллипсом, в который переходит изменяющийся по единичной окружности вектор внешнего воздействия (рис. 3). Для характерных значений элементов матрицы большая ось эллипса ориентирована по оси северо-северо-запад — юго-юго-восток, что совпадает с ориентацией линии берега в районе наблюдений, причем большая полуось имеет значения, близкие к 4, а малая — около 1 (см/м). Это означает, что для «эффективных» направлений ветра скорость ветра около 10 м/с вызывает дрейф льда со скоростью около 40 см/с, а для «неэффективных» — всего 10 см/с.

Под «эффективным» направлением подразумевается направление действия ветра, при котором ветровой дрейф принимает наибольшие значения.

Таким образом, влияние локальных особенностей дрейфа льда в прибрежной зоне восточного побережья о. Сахалин можно характеризовать изменяющимся по пространству эллипсом дрейфа, большая ось которого ориентирована вдоль линии

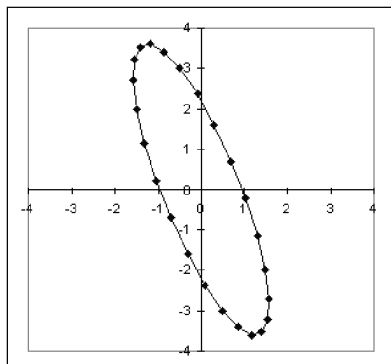


Рисунок 3. Эллипс дрейфа льда в прибрежной зоне для скорости ветра 1 м/с различных направлений

береговой черты. Значения большой полуоси эллипса незначительно уменьшаются по направлению с севера на юг, малая полуось увеличивается с удалением от берега и в мористой части принимает значения, близкие к значениям большой полуоси эллипса. Расчеты показывают, что коэффициент учета влияния локальных особенностей на ветровой дрейф льда (k_e) в районе восточного побережья Сахалина изменяется в пределах 0,25—1,00 и определяется ориентацией береговой черты, удаленностью от берега и направлением действия вынуждающей силы ветра.

Влияние силы ветра и сплоченности льда

Помимо учета влияния локальных особенностей района на перенос льда, необходимо учитывать нелинейность зависимости скорости дрейфа от скорости ветра и сплоченности льда.

В работе (Калинин, 1999) на основе данных РЛС проводится анализ связи «ветер–дрейф» для различных диапазонов скорости ветра и толщины льда. В эволюции льда на шельфе восточного Сахалина выделяются два характерных периода. Первый период — начало и первая половина зимы, характеризующийся небольшой средней толщиной льда (~80 см) и малой сплоченностью, второй период — вторая половина и окончание зимы, для которого характерны более толстые льды (~160 см) и повышенная сплоченность.

Результаты исследований (Калинин, 1999) показывают, что коэффициент ветрового дрейфа в зависимости от толщины льда, сплоченности и силы ветра лежит в пределах от 0,00 до 0,35, однако наибольшую повторяемость имеют значения 0,02—0,06. При увеличении скорости ветра скорость дрейфа льда возрастает быстрее в случае, когда средняя толщина льда меньше. Коэффициенты ветрового дрейфа в обоих случаях изменяются в зависимости от скорости ветра (рис. 4).

Для аппроксимации коэффициента учета влияния скорости ветра на дрейф льда использовалась следующая экспоненциальная функция, наиболее близко воспроизводящая представленную на рис. 4 зависимость изменения ветрового коэффициента от скорости ветра:

$$k_{mw} = 0,13e^{-0,08|\vec{W}|}, \quad (3)$$

где $|\vec{W}|$ — скорость ветра, м/с.

Согласно полученной функции коэффициент учета влияния скорости ветра (K_{mw}) может принимать значения от 0,120 (при ветре силой 1 м/с) до 0,018 (при действии ветра скоростью 25 м/с).

При рассмотрении нестационарного дрейфа необходимо оперировать параметром времени выхода льда в установившийся режим. Для льда толщиной до 1 м дрейф становится стационарным через 1—2 часа. Чем толще лед, тем больше времени нужно для преодоления его инерции и выхода на стационарный режим дрейфа. Поэтому для более толстых льдов этот промежуток времени достигает 6—10 часов (Калинин, 1999).

Кроме того, время выхода на стационарный режим при неизменной скорости ветра зависит и от линейных размеров льдины. Чем меньше размер льдины, тем сильнее нормальное сопротивление воды на боковую грань льдины. Рост сопротивления вызывает увеличение коэффициента турбулентности, и как следствие, приводит к быстрому наступлению стационарного режима. В результате мелкие льдины быстрее, чем толстые начинают дрейфовать под воздействием ветра, но и быстрее теряют скорость после прекращения действия ветра.

Наибольшее значение коэффициент дрейфа ветра, а также течения имеет при сплоченности льда 4—6 баллов (крупнобитый лед) и уменьшается при уменьшении или увеличении сплоченности. В общем виде кривая зависимости коэффициентов дрейфа ветра и течений имеет вид параболы (рис. 5) (Steiner, 2000).

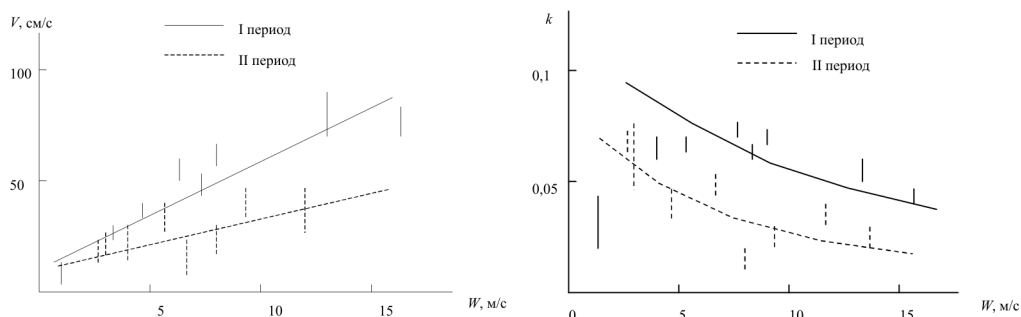


Рисунок 4. Обобщенные зависимости скорости ветрового дрейфа льда от скорости ветра и изменение ветрового коэффициента в зависимости от скорости ветра (Калинин, 1999)

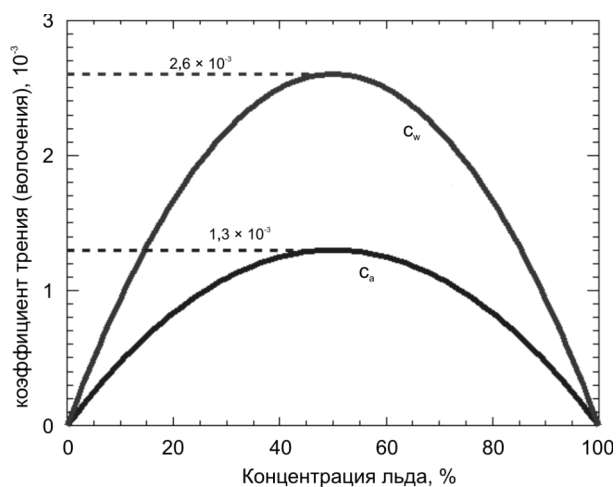


Рисунок 5. Квадратичная функция влияния сплоченности на дрейф льда (c_a — коэффициент трения (волочения) ветра, c_w — коэффициент трения (волочения) течений)

Анализ результатов исследований влияния ветра на дрейф льда при различной сплоченности, полученных разными авторами, показывает, что значения коэффициента ветрового дрейфа для различных районов достаточно близки. Так, в работе (Shirasawa *et al.*, 1991a) для Охотского моря коэффициенты определены для гладкого льда в пределах 0,02—0,05, для неровного льда — 0,04—0,06 (в пересчете с коэффициентов сопротивления). В работе (Guest *et al.*, 1991) аналогичные величины коэффициентов определены в пределах 0,04—0,05 для ровного льда и 0,05—0,06 для неровного льда (в пересчете с коэффициентов сопротивления).

В настоящей работе для учета влияния сплоченности льда на ветровой дрейф льда приняты значения коэффициента в пределах от 0,03 до 0,04, в связи с чем значения коэффициента, учитывающего влияние сплоченности льда на ветровой дрейф льда (K_{sw}), распределены по параболе и принимают величины в пределах от 1,0 до 1,3 с максимумом при сплоченности льда 5 баллов:

$$k_{sw} = -0,12S^2 + 0,12S + 1, \quad (4)$$

где S — сплоченность льда в баллах от 0 до 10.

Влияние течений на дрейф льда

В работе (Bruno *et al.*, 1989) влияние течений на дрейф выражается коэффициентами влияния течений на дрейф льда в диапазоне 0,06—0,09 от скорости течений для ровного льда и 0,07—0,14 — для неровного льда. В работе (Shirasawa *et al.*, 1991b) параметрические коэффициенты учета влияния течений на дрейф льда определены в интервале 0,03—0,17 для однолетнего льда и 0,04—0,19 для многолетнего льда.

Несмотря на большие абсолютные значения коэффициента, учитывающего влияние течений на дрейф льда, по сравнению с ветровым коэффициентом, вклад течений в формирование дрейфа льда значительно меньше ввиду небольших скоростей течений по сравнению со скоростями ветра. В связи с этим, в данной работе принимается средняя постоянная величина $K_{tc}=0,14$.

Так же как и для ветра, коэффициент, учитывающий влияние течений на дрейф льда, принимает максимальные величины при сплоченности льда 4—6 баллов и имеет вид параболы (рис. 5) (Steiner, 2000). При этом коэффициент, учитывающий влияние сплоченности льда на его дрейф, в зависимости от течений принимает значения от 1 до 1,5:

$$k_{sc} = -0,02S^2 + 0,2S + 1. \quad (5)$$

ВЕРИФИКАЦИЯ

Верификационный расчет проводился на основе формулы (1) для периода 11.01—10.02.1994 г. и сопоставлялся с наблюдениями за дрейфом буев ARGOS (Астафьев и др., 1997) в январе—феврале 1994 г.

Начальной точкой дрейфа выбрана точка нахождения буя ARGOS 11 января 1994 г. на траверзе зал. Пильтун.

Для получения полей приводного ветра использовались данные по полям давления из банка данных глобального реанализа NCEP/NCAR (NCEP/NCAR Project, 1996). Поле скоростей приводного ветра определялось по полю

атмосферного давления с учетом кривизны изобар и агеострофической составляющей. Учет поворота и уменьшения скорости ветра за счет трения в приводном слое производился с помощью эмпирической связи параметров устойчивости атмосферы от величины барической тенденции.

Задание полей течений проводилось на основе проведенных ранее расчетов с использованием трехмерной бароклинной модели со свободной поверхностью. Расчет схем течений проводился с учетом возбуждаемых приливов, переменных по времени и пространству полей скоростей ветра, градиентов атмосферного давления и климатического положения кромки льда (Зильберштейн и др., 2002).

Сплоченность льда задавалась стационарным полем средних значений сплоченности для умеренного по ледовым условиям января, построенного по данным (NOAA/NESDIS/OSDPD/SSD, 2004).

На цв. ил. 9 (стр. 220) представлен расчетный дрейф льда и схема дрейфа буев ARGOS за рассматриваемый период.

Полученные результаты в целом выявляют достаточно высокую сходимость скоростей и направлений перемещения буя и рассчитанной траектории дрейфа льда.

Заметные расхождения наблюдаются только при действии ветров с преобладанием зональной компоненты (даты: 14.01, 22—23.01, 27.01, 29.01) и в значительной степени обусловлены отсутствием учета процессов динамического взаимодействия льдин между собой и с береговой/припайной линией, что может приводить к ошибкам в определении скорости и направления дрейфа льда, особенно в прибрежной зоне.

За расчетный период средняя ошибка расчетного суточного дрейфа льда по сравнению с перемещением буя составила менее 4 км. Средняя скорость измеренного дрейфа буя равна 32 км/сут., средняя скорость расчетного дрейфа — 35 км/сут. Максимальная наблюдаемая скорость дрейфа буя 53 км/сут., расчетная — 54 км/сут. Коэффициент корреляции расчетных среднесуточных скоростей дрейфа и скоростей перемещения буя равен 0.7. Средняя относительная погрешность скоростей составляет 22%.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокойходимости проведенных расчетов с наблюдениями. Несмотря на то, что единичной траектории недостаточно для детальной верификации расчетов дрейфа льда, в целом можно сделать заключение о применимости данного подхода для оценок скоростей дрейфа льда в районе восточного побережья о. Сахалин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная параметрическая модель дрейфа льда позволяет проводить оценки генерального дрейфа льда на восточном шельфе о. Сахалин с учетом сплоченности ледовых полей, приводного ветра, морских течений и прибрежных особенностей. Среди основных достоинств данной модели является простота реализации и возможность использования в качестве расчетного блока для траекторной модели разливов нефти в ледовых условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят компанию «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.» за финансирование работы по моделированию разливов нефти в ледовых условиях, в рамках которой разработана данная модель дрейфа льда. Авторы выражают отдельную благодарность Сергею Александровичу Покрашенко за конструктивные замечания и консультации в ходе выполнения данной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Астафьев В.Н. и др.** Торосы и стамухи Охотского моря / В.Н. Астафьев, Г.А. Сурков, П.А. Трусков. — СПб.: Прогресс-Погода, **1997**. — 197 с.
- Астафьев В.Н. и др.** Ледовые исследования на шельфе северного Сахалина / В.Н. Астафьев, Э.Н. Калинин, А.М. Поломошнов, Г.А. Сурков; СахалинНИПИморнефть. — Южно-Сахалинск, **1999**. — 26 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей.** т. IX Охотское море. Вып. 1 Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского, Н.П. Гонтарева, Ф.С. Терзиева. — СПб.: Гидрометеоиздат, **1998**. — 344 с.
- Зильберштейн О.И. и др.** Расчет трехмерных полей суммарных течений для районов Охотского и Японского морей на 10-летний период. Научно-технический отчет / О.И. Зильберштейн, С.К. Попов. — М., **2002**.
- Калинин Э.Н.** Исследование дрейфа льда северо-восточного шельфа о. Сахалин. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата географических наук. — Владивосток: ТОИ ДВО РАН, **1999**. — 26 с.
- Плотников В.В. и др.** Режим и изменчивость состояния ледяного покрова Охотского моря / В.В. Плотников, А.И. Гаврев, А.А. Пан и др. — ТОИ ДВО РАН, **2000**. — (www.pacificinfo.ru).
- Покрашенко С.А. и др.** Исследование дрейфа льда на шельфе о.Сахалин с помощью методов радиолокации / С.А. Покрашенко, П.А. Трусков, Л.П. Якунин // Тр. ДВНИИ. — **1987**. №36. — С. 49—52.
- Тамбовский В.С. и др.** Характеристика скорости дрейфа льда у северо-восточного побережья о. Сахалин под влиянием приливов и ветра / В.С. Тамбовский, Г.В. Шевченко // Тематический вып. ДВНИГМИ №2. — Владивосток: Дальнаука, **1999**.
- Якунин Л.П.** Ледовые исследования на дальневосточных морях // Тр. ДВНИИ. — **1979**. №77. — С. 102—107.
- Bruno M.S. et al.** Coupled Circulation and Ice Floe Movement Model for Partially Ice-Covered Continental Shelves / M.S. Bruno, O.S. Madsen // In: Journal of Geophysical Research. — **1989**. №94(C2). — P. 2065—2077.
- Guest P.S. et al.** The Aerodynamic Roughness of Different Types of Sea Ice / P.S. Guest, K.L. Davidson // Journal of Geophysical Research. — **1991**. №96(C3). — P. 4709—4721.
- NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project** / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins et al. // In: Bulletin of the American Meteorological Society, **1996**. №77(3). — P. 437—471.

- NOAA/NESDIS/OSDPD/SSD.** IMS daily Northern Hemisphere snow and ice analysis at 4 km and 24 km resolution. — Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center, **2004** (updated 2006). — Digital media.
- Shevchenko G.V. et al.** On wind and tide induced sea-ice drift on the northeastern shelf of Sakhalin Island (analysis of radar data) / G.V. Shevchenko, V.F. Putov // In: PICES Sci. Rep. — **1999**. №12. — P. 11—17.
- Shirasawa K. et al.** Atmospheric Boundary Layer Measurements Over Sea Ice in the Sea of Okhotsk / K. Shirasawa, M. Aota // In: Journal of Marine Systems. — **1991a**. №2. — P. 63—79.
- Shirasawa K. et al.** Characteristics of the Turbulent Oceanic Boundary Layer Under Sea Ice / K. Shirasawa, R.G. Ingram // In: Journal of Marine Systems. Part 1: A Review of the Ice-Ocean Boundary Layer. — **1991b**. №2. — P. 153-160.
- Steiner N.** Introduction of Variable Drag Coefficients into Sea-Ice Models // In: Annals of Glaciology. — **2000**. №33.