

УДК 551.466.7

## Оценки скорости дрейфа льда на северо-восточном шельфе о. Сахалин по данным радиолокационных измерений

Г.В. Шевченко<sup>1\*</sup>, В.С. Тамбовский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Российская Федерация, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1-Б

<sup>2</sup> Экологическая компания Сахалина, Российская Федерация, 693007, г. Южно-Сахалинск, ул. Рождественская, д. 63

\* E-mail: g.shevchenko@imgg.ru

**Тезисы.** Приведены характеристики приливного, непериодического (ветрового) и суммарного дрейфов на северо-восточном шельфе о. Сахалин, определенные путем анализа результатов измерений, выполненных при помощи береговых радиолокационных станций. Показана возможность применения полученных результатов в ряде практически важных задач: оперативного прогноза дрейфа экстремальных ледовых образований; расчета экстремальных скоростей дрейфа редкой повторяемости и возможных нагрузок на сооружения на шельфе с учетом размеров и веса ледяных полей (по данным вертолетных десантов); оценки истирающего влияния дрейфующего льда на ледостойкие основания буровых платформ.

**Ключевые слова:** шельф Сахалина, ледовая нагрузка на объекты нефтегазового комплекса, характеристики дрейфа льда, радиолокационные измерения, оперативный прогноз, расчет экстремальных скоростей, оценка истирающего влияния дрейфующего льда.

Нагрузки на буровые платформы, трубопроводы и иные объекты инфраструктуры нефтегазового комплекса на северо-восточном шельфе о. Сахалин, обусловленные быстро движущимися опасными ледовыми образованиями – несяками и гигантскими ледовыми полями, являются одной из наиболее серьезных угроз безопасной эксплуатации таких объектов. Поэтому актуальны задачи оценки статистических характеристик скорости дрейфа, возможных скоростей редкой повторяемости и экстремальных нагрузок на сооружения, прогноза движения опасных ледовых образований в реальном времени, а также оценки возможного истирания льдом ледостойких оснований буровых платформ. В 1980–1990 гг. в названном районе в большом объеме проводились исследования ледяного покрова, которые помимо традиционных вертолетных десантов и береговых наблюдений включали уникальные измерения скорости и направления дрейфа при помощи судовых радиолокаторов (РЛС), установленных на специальных береговых вышках. Измерения производились в фиксированных точках, благодаря чему были получены векторные временные ряды, аналогичные рядам данных о скорости течений, что позволило применить к ним стандартные методы статистического и спектрального анализа [1–3].

Далее кратко охарактеризованы результаты анализа указанных уникальных материалов наблюдений за дрейфом льда; приливная и непериодическая (ветровая) составляющие рассмотрены по отдельности. Это позволяет получить ряд оценок, важных для обеспечения деятельности буровых платформ на ледостойких основаниях в холодный период года.

### Организация измерений

О применении российскими исследователями береговых РЛС для изучения дрейфа морского льда в дальневосточных морях известно давно. Традиционный подход к слежению за отдельными ледяными объектами описан В.Я. Жмурко [4].

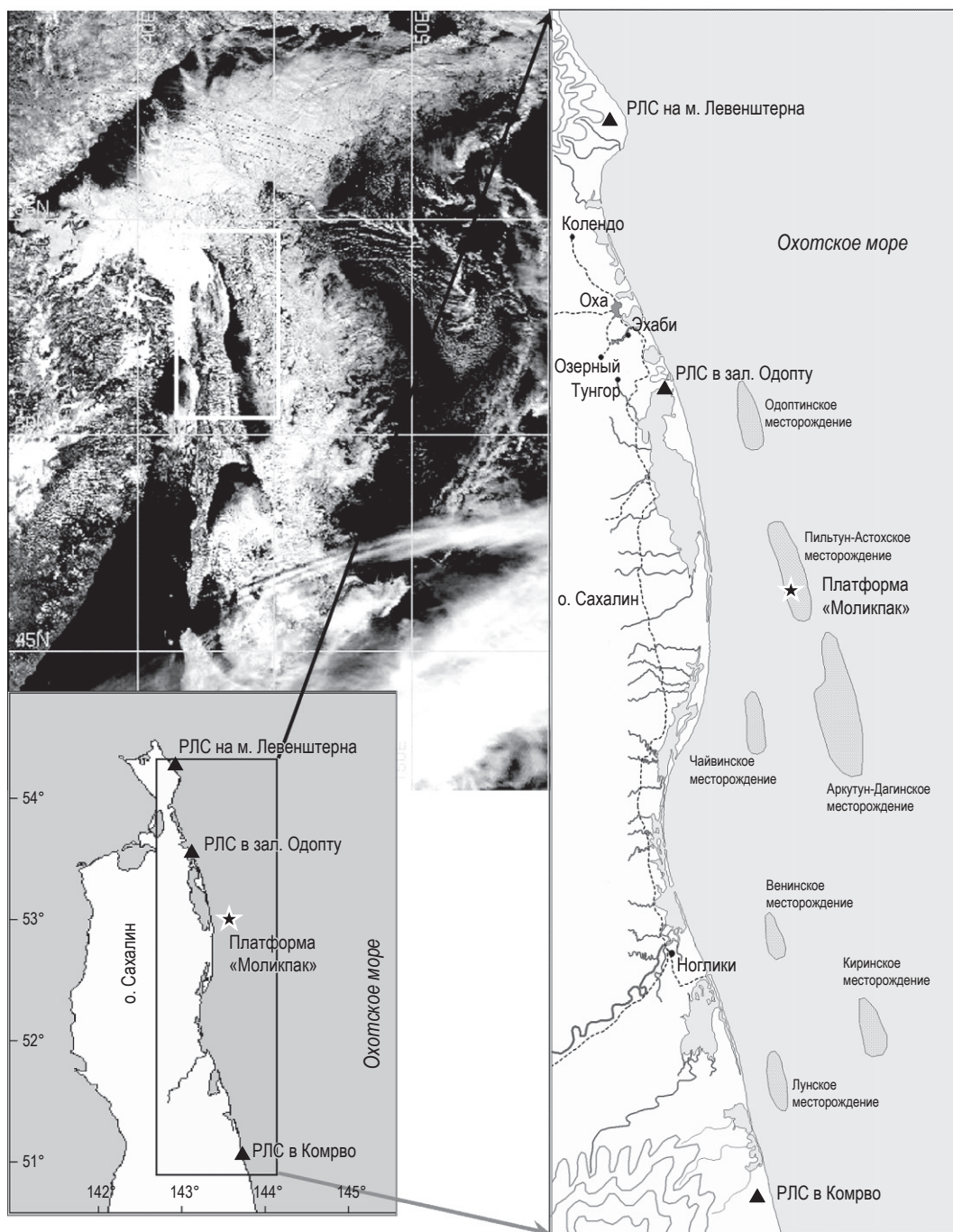
В 1982 г. специалистами СахУГМС и СахалинНИПИморнефть Е.Н. Морозовым и П.А. Трусковым разработана другая методика измерений дрейфа льда с применением РЛС, установленных на береговых вышках. Дрейф льда наблюдался в фиксированных точках на расстояниях от берега минимум 4 и максимум 12 км. Глубина моря в самых близких к берегу точках составляла 10–15 м, в наиболее удаленных –

около 50 м. Распознавание льдин и наблюдение за их перемещением производилось по выделенным характерным особенностям геометрических форм, дающих четкий сигнал на индикаторе. Это позволило получить продолжительные ежечасные векторные ряды скорости дрейфа в фиксированных точках [1].

Характерной особенностью расположения границ льда в массиве (по направлению от бе-

рега в мористую часть) является наличие вдоль берегового припая, заприпайной полыньи, пояса сильно восторошенного дрейфующего однолетнего льда и зоны слабосторошенных полей однолетних и молодых льдов (рис. 1, см. фотоснимок). РЛС-измерения касались главным образом пояса тяжелого дрейфующего льда.

На северо-восточном шельфе о. Сахалин установлены три РЛС (см. рис. 1): на самом



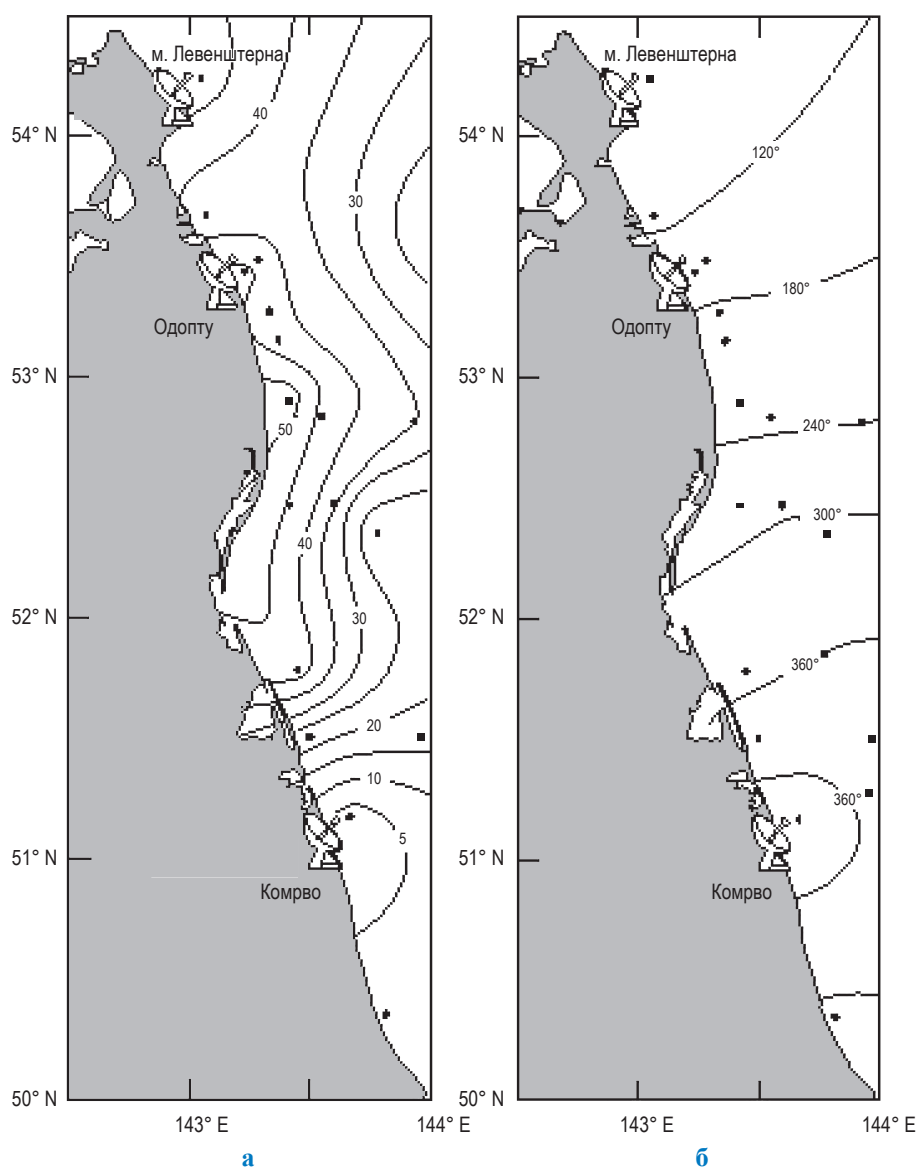
**Рис. 1. Расположение береговых РЛС наблюдения за дрейфом льда на северо-восточном шельфе о. Сахалин и космический фотоснимок ледовой обстановки в изучаемом районе за 8 марта 2000 г.**

севере изучаемого района (м. Левенштерна), в его центральной (зал. Одопту) и южной (метеостанция «Комрво» южнее Лунского зал.) частях. Аналогичные работы, правда, в меньшем объеме выполнены при помощи судового радара ледостойкой добывающей буровой платформы «Моликпак». Для оценок отклика дрейфа на воздействие ветра рядом с РЛС были оборудованы метеоплощадки, на которых ежедневно измерялись скорость и направление ветра.

В изучаемом районе суточный приливной дрейф льда отличается очень высокими скоростями на севере и их значительным ослаблением на юге. Эта особенность связана

со специфической волновой картиной приливов, а именно с вкладом суточных захваченных шельфовых волн, пространственный масштаб которых оставляет около 300 км. Сильные приливные течения препятствуют смерзанию льдов и образованию сплошного ледяного покрова, а отжимные ветра северо-западного румба, характерные для холодного периода года в данном районе, способствуют формированию запримайной полыньи.

Построение эмпирической карты приливных течений в изучаемом районе (рис. 2), хорошо согласующейся с результатами численного моделирования [5], позволяет предвычислить



**Рис. 2. Эмпирическая карта распределения на северо-восточном шельфе о. Сахалин амплитуд скорости, см/с, (а) и фаз (б) меридиональной проекции главной суточной волны  $K_1$ , рассчитанная на основе значений скорости течений, измеренных в 32 точках, и значений скорости дрейфа, измеренных на трех РЛС**

скорость приливного дрейфа в любой его точке на заданный интервал времени с достаточно высокой точностью, что имеет важное значение для решения ряда прикладных задач.

Ряды непериодического дрейфа, полученные путем вычитания из исходных значений проекций предвычисленного прилива, сравнивались с полученным на РЛС рядами проекций векторов скорости ветра. Для описания взаимодействия между дрейфом льда и скоростью ветра удобно воспользоваться уравнением регрессии в матричной форме, где регрессионная матрица  $A$  представляет собой четыре коэффициента ( $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ), характеризующие реакцию дрейфа как на коллинеарные, так и на нормальные компоненты скорости ветра [1, 2]. Результаты расчетов для двух лет (1992 и 1993 гг.) на станциях «Одопту» и «Комрво» показали высокую стабильность, хотя и несколько различались между собой. Отметим большое различие в отклике на «эффективные» (когда ветровой коэффициент близок к максимальным значениям) и «неэффективные» (когда он мал) направления ветра.

Заметим также, что характер отклика на воздействие ветра различается в зависимости от сплоченности ледяного покрова. Так, при максимальных значениях сплоченности (март) эллипсы отклика более сжаты и несколько меньше по величине, чем в начале или в конце ледового сезона. Аналогично изменяются и приливные эллипсы.

Далее остановимся вкратце на некоторых прикладных аспектах возможного применения полученных результатов.

### **Оперативный прогноз дрейфа (методика Тамбовского – Бобкова)**

Эмпирическая модель движения опасных ледовых образований (несяков, крупных ледяных полей) заключалась и следующем. Область северо-восточного шельфа была разбита на блоки. Гармонические постоянные приливного дрейфа и ветровые коэффициенты считались одинаковыми в пределах каждого блока и медленно менялись между блоками. При появлении опасного ледового образования на северном участке изучаемого района рассчитывался приливной дрейф на ближайшие сутки. Ветровой дрейф определялся с помощью ветровых коэффициентов по имеющемуся суточному прогнозу скорости и направления

ветра. При выходе объекта в следующий блок снова выполнялась аналогичная процедура.

Средние и экстремальные значения суточного дрейфа льда, полученные расчетным путем и при анализе перемещения ледяных полей по ежедневным спутниковым снимкам, показали хорошую сходимость. Тестирование метода и его применение при проведении работ во льду осуществлялись в 2004–2006 гг. в ходе обеспечения морских операций для проекта «Сахалин-2» на производственном комплексе «Витязь», а также в 2009 и 2012 гг. при бурении поисково-разведочных скважин на Венинском блоке для ООО «Венинефть». Полученные оценки скоростей дрейфа льда позволяли быстро определять время движения вынесенного тяжелого льда от северной оконечности о. Сахалин до расположения комплекса «Витязь». Эти сведения были важны для анализа рисков и планирования производственных морских операций в ледовых условиях. Предложенная модель показала высокую эффективность, за исключением одного особого случая.

Этот особый случай относится к позднему выносу тяжелого льда на северо-восточный шельф Сахалина в конце мая – начале июня, в то время как акватория северо-восточного шельфа уже очистилась ото льда. Это явление связано с обусловленным весенним половодьем р. Амур взломом ледяной перемычки, разделяющей Амурский лиман и Сахалинский залив. Тяжелый лед быстро выносятся с теплыми слабосолеными водами. Именно наличие этих вод в изучаемом районе обеспечивает движение тяжелого льда на юг при уже установившихся южных ветрах летнего муссона и ослаблении Восточно-Сахалинского течения. Учитывая неопределенность гидрологических условий, прогнозировать дрейф опасных ледовых объектов в этот период очень сложно, данное явление требует специального изучения.

### **Расчет скоростей дрейфа редкой повторяемости**

Метод композиции приливной и непериодической составляющих течений [6] применялся для расчета скоростей дрейфа редкой повторяемости [3]. Измерения скорости дрейфа льда при помощи судовой РЛС выполнялись также с буровой платформы «Моликпак» обычно в конце ледового сезона (май). Для характеристики распределения приливной компоненты дрейфа

льда предвычислены векторы скорости приливного дрейфа льда на период 2000–2018 гг. (только на май месяц), что необходимо для учета межгодовых вариаций приливов с периодом 18,6 года. Максимальные скорости приливного дрейфа льда (при таком расчете их можно считать экстремальными по астрономическим условиям) составили 92 и 84 см/с для северного и южного румбов соответственно. Особенностью рассматриваемого периода являются близкие значения повторяемости непериодического дрейфа южного (27 %) и северного (25 %) румбов, максимальные скорости дрейфа в этом случае составили 84 и 75 см/с соответственно.

Для представляющих интерес с практической точки зрения периодов повторяемости 50 и 100 лет значения скорости соответственно составили около 150 и 160 см/с для обоих румбов. Такие, по сути, симметричные оценки возможны на северо-восточном шельфе о. Сахалин только в мае.

Измерения скорости дрейфа на береговой РЛС в зал. Одопту проводились с 1986 по 1996 г. в течение всех ледовых сезонов. Это позволило детально исследовать сезонную изменчивость динамики дрейфа льдов в изучаемом районе. Непериодическая компонента скорости дрейфа оценивалась путем объединения всех имеющихся серий наблюдений, предварительно «очищенных» от прилива, раздельно для каждого месяца.

Наибольшие скорости получены для февраля (для января расчет не выполнялся из-за недостаточной обеспеченности данными наблюдений), когда и непериодическая компонента максимальна, и приливная тоже велика. Для периодов повторяемости 50 и 100 лет получены значения 204 и 211 см/с соответственно. В марте значения скорости для этих периодов повторяемости уменьшаются, в апреле еще в большей степени снижаются, а в мае немного возрастают.

**Для оценки максимальных нагрузок на сооружения** нефтегазового комплекса на шельфе необходимо знать не только приведенные ранее значения скоростей дрейфа редкой повторяемости, но и возможный вес экстремальных ледовых образований. С целью построения распределения соответствующих масс (рис. 3) рассмотрены материалы измерений, выполненных в 1983–1993 гг. при ледовых десантах. Всего проанализированы 2125 записей в журналах наблюдений, где отмечались размеры ледяного поля, на который высаживался десант, а также фиксировались толщина монолитного льда, толщина пористого льда в подводной части ледяного образования, средняя высота торосов и ряд других параметров. Подобные материалы давали возможность составить только приблизительные оценки. Площадь определялась в предположении ледяного образования прямоугольной формы (в записях обычно указывались его длина и ширина). В некоторых случаях вертолетными

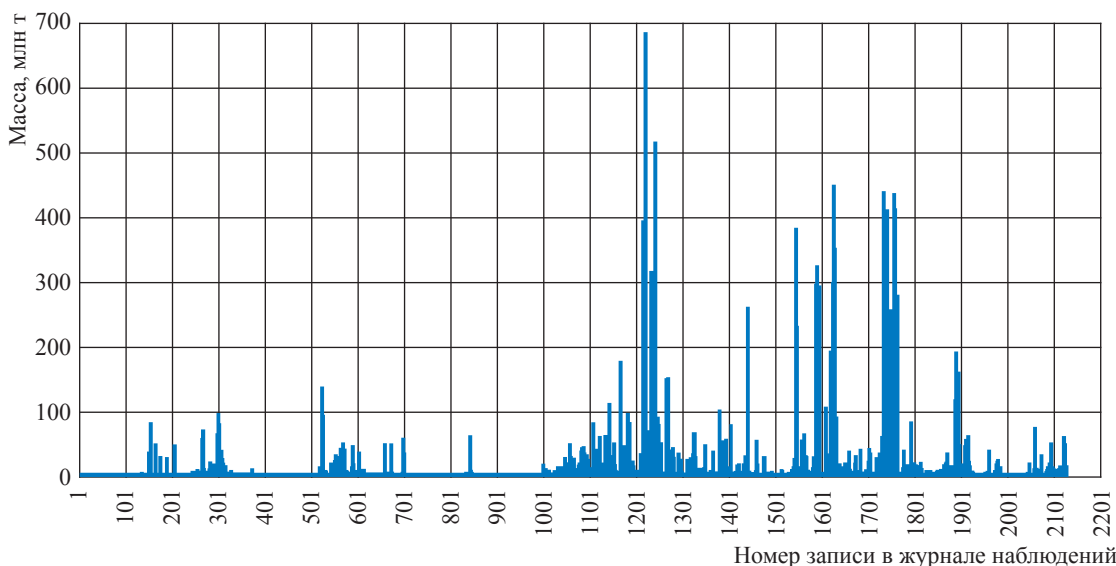


Рис. 3. Распределение масс ледовых образований, построенное по результатам вертолетных обследований 1983–1993 гг. (всего 2125 объектов)

десантами обследовались гигантские ледяные поля, максимальный зафиксированный размер которых составил  $15 \times 25$  км.

Толщины монолитного и пористого льда, полученные в точке бурения, предполагались одинаковыми в пределах всего объекта. Согласно результатам анализа отобранных образцов, плотность,  $\text{кг/дм}^3$ , монолитного льда равнялась 0,95, пористого – 0,86 (в частности, экстремальные ледяные поля состояли преимущественно из пористого льда). Средняя высота торосов учитывалась с коэффициентом 0,6. Эти оценки носят предварительный характер и будут уточнены в дальнейшем.

С учетом отмеченных факторов, влиявших на точность расчетов, максимальная масса ледового образования  $\approx 689$  млн т. Только в одном случае отмечено ледяное роле массой более полумиллиона тонн, но 10 ледовых образований весили около или выше 400 млн т, средняя повторяемость составила около 1 случая в год.

Для оценки экстремальных нагрузок (импульсов) необходимо массу ледовых образований сопоставить со скоростью их перемещения. При проведении десантов скорость дрейфа не определялась, в таком случае можно использовать приведенные выше оценки скоростей редкой повторяемости. По полученным результатам, экстремальная нагрузка ориентировочно может составить  $769 \text{ млн т} \times 2,1 \text{ м/с} = 1446,9 \text{ млн т} \cdot \text{м/с}$ , однако оценить период ее повторяемости весьма сложно.

### Истирающее влияние льда на основания буровых платформ

Еще одним важным приложением полученных характеристик скорости дрейфа являются оценки истирающего влияния дрейфующего льда на шельфовые объекты нефтегазового комплекса. Известно, что глубина истирания (ледовой абразии)  $S$  пропорциональна суммарному пути, который лед в течение ледового сезона прошел вблизи заданного объекта с определенной стороны [7]:

$$S = S_{\text{сн}} \sigma_{\text{л}} L,$$

где  $S_{\text{сн}}$  – коэффициент сопротивления материала истиранию;  $\sigma_{\text{л}}$  – контактное давление льда (зависит от нормальной к поверхности составляющей дрейфа);  $L$  – расстояние, которое проходят плавучие льдины вдоль корпуса конструкции. Полученные материалы

РЛС-наблюдений позволяют определить это расстояние, пусть и не непосредственно в точке расположения объекта, но достаточно близко. Пройденный за часовой промежуток времени путь можно рассчитать по ежечасному вектору, а затем просуммировать за весь период наблюдений. В качестве примера рассмотрим соответствующие оценки для меридиональной и зональной составляющих величины  $L$  за 1993 г. для РЛС в зал. Одопту. Наблюдения начались в феврале, затем лед из зоны обзора локатора ушел. Непрерывный ряд наблюдений охватывал период с 10 марта по 25 мая (1852 часовых отсчета).

Суммарное перемещение льда (вне зависимости от знака проекции, так как учитывался модуль скорости) за указанный период в зональном направлении составило 427 км, в меридиональном оно значительно больше – 1984 км. Перемещение без учета прилива, рассчитанное по непериодической составляющей, равнялось для зональной компоненты 328 км, для меридиональной – 1003 км. Эти данные могут быть использованы при оценке истирающего влияния льда на объекты нефтегазового комплекса на северо-восточном шельфе о. Сахалин.

\*\*\*

В работе представлен обзор ряда публикаций, посвященных анализу материалов радиолокационных измерений скорости и направления дрейфа льда на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Несмотря на то что наблюдения были прекращены 20 лет назад, полученные результаты не утратили актуальности, с их помощью и сейчас могут быть получены новые результаты, в том числе важные в прикладном отношении, в частности:

1) статистическая модель прогнозирования скорости движения опасных ледовых образований в реальном времени на основе предвычисления скорости приливного дрейфа на различных участках изучаемого района и применения матрицы ветровых коэффициентов к прогностическому ряду векторов скорости ветра;

2) оценки экстремальных скоростей дрейфа льда для различных месяцев ледового сезона, полученные методом композиции распределений приливной и непериодической составляющих дрейфа;

3) распределение веса ледовых образований, построенное по материалам обследований

при вертолетных десантах 1983–1993 гг., и расчет возможных экстремальных нагрузок на объекты нефтегазового комплекса;

4) оценки суммарного пути, который в течение ледового сезона проходит лед через зону лоатора береговой РЛС, необходимые для

расчета истирающего влияния льда на ледостойкие основания буровых платформ и иные объекты нефтегазового комплекса на шельфе (поперечная компонента дрейфа позволяет оценить контактное давление льда на объект).

### Список литературы

1. Тамбовский В.С. Характеристика скорости дрейфа льда у северо-восточного побережья острова Сахалин под влиянием приливов и ветра / В.С. Тамбовский, Г.В. Шевченко // Труды ДВНИГМИ. – Владивосток: Дальнаука, 1999. – № 2: тематический выпуск. – С. 114–137.
2. Shevchenko G. Sea-ice drift on the northeastern shelf of Sakhalin Island / G. Shevchenko, A. Rabinovich, R. Thomson // *Journal of Physical Oceanography*. – 2004. – V. 34. – № 11. – P. 2470–2491.
3. Шевченко Г.В. Расчет экстремальных скоростей дрейфа льда на северо-восточном шельфе о. Сахалин по данным радиолокационных измерений / Г.В. Шевченко, В.С. Тамбовский // *Метеорология и гидрология*. – 2016. – № 7. – С. 37–46.
4. Жмурко В.Я. Радиолокационные наблюдения над дрейфом маркированных льдов / В.Я. Жмурко // *Океанология*. – 1971. – Т. XI. – Вып. 6. – С. 1110–1115.
5. Kowalik Z. Tides in the Sea of Okhotsk / Z. Kowalik, I. Polyakov // *J. Phys. Oceanogr.* – 1998. – V. 28. – № 7. – P. 1389–1409.
6. Шевченко Г.В. Расчет экстремальных скоростей течений методом композиции распределений (на примере Пильтун-Астохского месторождения нефти северо-восточного шельфа о. Сахалин) / Г.В. Шевченко // *Метеорология и гидрология*. – 2004. – № 1. – С. 53–73.
7. Вершинин С.А. Трение и истирающее воздействие льда на сооружения континентального шельфа / С.А. Вершинин, П.А. Трусков. – М.: Атлет-пресс, 2010. – 196 с.

## Estimation of ice-drift velocities on north-eastern shelf of Sakhalin according to data of radar measurements

G.V. Shevchenko<sup>1\*</sup>, V.S. Tambovskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Bld. 1-B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation

<sup>2</sup> Environmental Company of Sakhalin, Bld. 63, Rozhdestvenskaya street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693007, Russian Federation

\* E-mail: g.shevchenko@imgg.ru

**Abstract.** The characteristics of tidal, residual (wind-induced) and total drift velocities at the northeastern shelf of Sakhalin Island obtained by analysis of coastal radar measurements are given. The possibility of applying the obtained results to a number of practically important problems is shown. Among these applications are the real time prediction of drift of extreme ice formations; calculation of the rare recurrence ice drift velocities and possible loads to the offshore constructions on account of size and weight of the ice fields (according to helicopter assault data); and estimates of the abrasive effect of drifted ice on the ice-resistant bases of drilling platforms.

**Keywords:** continental shelf of Sakhalin, ice load to the oil-gas facilities, ice drift characteristics, radar measurements, first-line forecast, calculation of extremal velocities, evaluation of abrasive action of drifting ice.

### References

1. TAMBOVSKIY, V.S. and G.V. SHEVCHENKO. Velocity of ice drift nearby the north-eastern coastal line of Sakhalin affected by tides and wind [Kharakteristika skorosti dreyfa lda u severo-vostochnogo poberezhya ostrova Sakhalin pod vliyaniem prilivov i vetra]. In: *Proc. of the Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute*. Vladivostok: Dalnauka, 1999, no. 2, pp. 114–137. (Russ.).
2. SHEVCHENKO, G., A. RABINOVICH, R. THOMSON. Sea-ice drift on the northeastern shelf of Sakhalin Island. *Journal of Physical Oceanography*. 2004, vol. 34, no. 11, pp. 2470–2491. ISSN 0022-3670.

3. SHEVCHENKO, G.V. and V.S. TAMBOVSKIY. Calculation of extremal values of ice drift velocity at the north-eastern shelf of the Sakhalin Island according to radar data [Расчет экстремальных скоростей дрейфа льда на северо-восточном шельфе о. Сахалин по данным радиолокационных измерений]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2016, no. 7, pp. 37–46. ISSN 0130-2906. (Russ.).
4. ZHMURKO, V.Ya. Radar observations of the marked ice drift [Радиолокационные наблюдения над дрейфом маркированных льдов]. *Okeanologiya*. 1971, vol. T. XI, is. 6, pp. 1110–1115. ISSN 0030-1574. (Russ.).
5. KOWALIK, Z. and I. POLYAKOV. Tides in the Sea of Okhotsk. *Journal of Physical Oceanography*. 1998, vol. 28, no. 7, pp. 1389–1409. ISSN 0022-3670.
6. SHEVCHENKO, G.V. Calculating extremal velocities of tides by a method of distribution composition (on example of Piltun-Astokh oil field at the North-East shelf of Sakhalin) [Расчет экстремальных скоростей течений методом композиции распределений (на примере Пилтун-Астокхского месторождения нефти северо-восточного шельфа о. Сахалин)]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2004, no. 1, pp. 53–73. ISSN 0130-2906. (Russ.).
7. VERSHININ, S.A. and P.A. TRUSKOV. *Friction and abrasive impact of ice to the offshore facilities* [Трение и истирающее воздействие льда на сооружения континентального шельфа]. Moscow: Atlet-press, 2010. (Russ.).