

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ РОВНОГО ЛЬДА НА ДРЕЙФУЮЩЕЙ СТАНЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-38»

канд. ф.-мат. наук В.В.ХАРИТОНОВ

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

В 2010–2011 гг. на ледовом полигоне на дрейфующей станции «Северный полюс-38» проводились измерения толщины ровного льда. Выполнен анализ полученных данных в сравнении с данными предыдущих экспедиций. Эмпирическая формула оценки толщины ледяного покрова в зависимости от количества градусо-дней мороза и толщины снежного покрова хорошо аппроксимирует полученные экспериментальные данные. Приведены графики, показывающие соответствие расчетных и измеренных значений толщины льда. Приращение средней толщины остаточного однолетнего льда при увеличении его возраста на один год оценивается в 50 см. Средняя толщина снежного покрова на ледовом полигоне не превышала 26 см. Коэффициент корреляции скорости нарастания льда и скорости подледных течений, равный 0,5, является статистически значимым, что указывает на связь этих параметров.

Ключевые слова: толщина льда, градусо-дни мороза, снежный покров, СП-38.

Целью исследований являлось получение морфометрических характеристик ровного недеформированного льда и снежного покрова в течение годового цикла. Для достижения поставленной цели выполнялось измерение толщины льда и высоты снежного покрова на ледовом полигоне.

Выбор места, разметка полигона и первые измерения на ледовом полигоне СП-38 были выполнены 28 октября 2010 г. Полигон представлял собой равномерную сетку в виде квадрата 100×100 м с расстоянием между точками 20 м. Измерения толщины льда и высоты снежного покрова во всех 36 точках проводились с интервалом в 9–12 дней. Для бурения льда использовался мотобур Hitachi со шнеками Ковакса. Измерения толщины льда в скважине проводились ледомерной рулеткой. Превышение поверхности льда над уровнем океана измерялось один раз в начале наблюдений.

До июля 2011 г. измерения толщины льда и высоты снежного покрова осуществлялись по меткам на деревянных рейках-реперах, вмороженных в лед у каждой точки полигона. При этом полагалось, что деревянная рейка вморожена прочно, а высота условной метки относительно верхней поверхности льда постоянна. Таким образом, толщина льда определялась вычитанием высоты условной метки из измеренной высоты от нижней поверхности льда до метки. Начиная с июля из-за вытаивания реперов толщина ледяного покрова измерялась относительно его верхней поверхности.

В середине августа в результате трещины и подвижек льда четыре точки полигона оказались заторошенными. Наблюдения были продолжены на оставшейся части полигона. Всего было выполнено 34 измерения толщины льда и снежного покрова.

Наблюдения за нарастанием льда на полигоне СП-38 были начаты в период, когда уже шло активное его нарастание, продолжавшееся вплоть до второй декады июня.

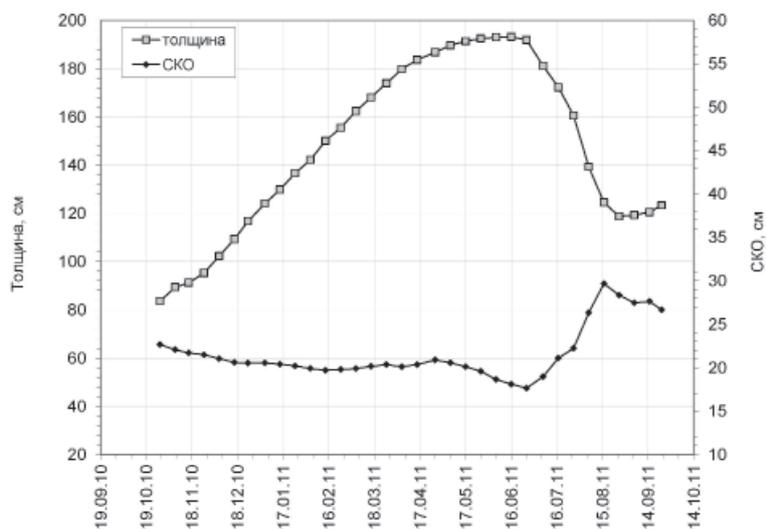


Рис. 1. Временное изменение среднего значения и СКО толщины льда на ледовом полигоне СП-38.

Скорость нарастания льда монотонно убывала в течение этого срока наблюдений и к середине июня достигла нуля. За период с 28.10.10 г. по 16.06.11 г. средняя толщина льда на полигоне выросла с 84 до 193 см, т.е. на 109 см.

Начиная с июня снежный покров полностью сошел в течение месяца. Появление небольших отдельных снежинок было зафиксировано в конце июня. К третьей декаде июля около 35 % площади полигона было покрыто снежинками. В трех снежинках зафиксированы крупные (до метра) сквозные промоины. В период с конца мая в течение примерно трех недель средняя толщина льда практически не менялась. Лед находился в состоянии термодинамического равновесия – не нарастая и не тая. В первой декаде июля началось активное таяние ледяного покрова. С середины июля отмечался внутриводный лед, что свидетельствовало о стоке талой воды под нижнюю поверхность льда. Таяние льда продолжалось вплоть до середины августа (средняя толщина льда достигла 125 см), а затем замедлилось и приостановилось. К концу августа средняя толщина льда достигла минимальной отметки в 119 см. С начала сентября отмечено постепенное увеличение средней толщины льда на полигоне. К моменту завершения наблюдений она составляла 123 см.

На рис. 1 приведен график изменения среднего значения и среднеквадратичного отклонения (СКО) толщины льда в течение всего периода наблюдений на СП-38. Поведение СКО указывает на постепенное выравнивание толщины льда на полигоне во время нарастания льда. Однако с началом летнего таяния СКО толщины льда резко увеличилось в связи с образованием снежинок, промоин, попаданием талой воды под ледяной покров.

На рис. 2 приведен график изменения средней толщины ледяного покрова на полигоне в зависимости от количества градусо-дней мороза, прошедших с начала наблюдений. В работе [Кузнецов, Гарманов, 1987] рассмотрены эмпирические формулы для расчета толщины ровного льда в зависимости от различных параметров, предлагаемые разными авторами. Наиболее интересны формулы, учитывающие количество

градусо-дней мороза, прошедших с момента начала наблюдений, и толщину снежного покрова [Доронин, 1959, 1997; Шестериков, 1963; Николаева, Шестериков, 1970]. Физический смысл одного из эмпирических коэффициентов состоит в том, что он соответствует отношению теплопроводностей льда и снега. Теплопроводность снега сильно зависит от плотности и изменяется в широких пределах [Кузьмин, 1957]. Обычно используется среднее значение, хотя разные авторы используют разные значения. Расчетные значения, наиболее близкие к экспериментальным данным, дает формула Доронина [1959], модифицированная Кузнецовым и Гармановым [1987], при условии, что эмпирический коэффициент в ней, соответствующий отношению теплопроводностей льда и снега, взят из формулы Шестерикова [1963]. Формула выглядит так:

$$H = -6,9h + \sqrt{(6,9h + H_0)^2 + 12\Sigma(-T_a)},$$

где H – толщина льда, h – толщина снега, H_0 – начальная толщина льда, $\Sigma(T_a)$ – количество градусо-дней мороза, прошедшее с начала наблюдений. Зависимость, рассчитанная по этой эмпирической формуле, приведена на рис. 2.

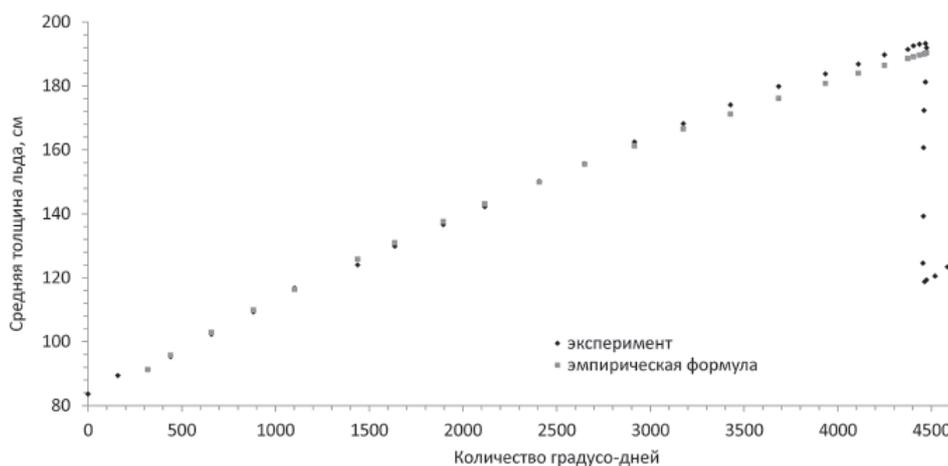


Рис. 2. Изменение средней толщины льда на ледовом полигоне СП-38 в зависимости от количества градусо-дней мороза, прошедших с начала наблюдений.

По этой эмпирической формуле был выполнен расчет нарастания толщины льда и сравнение с экспериментальными данными, полученными во время дрейфа предыдущих станций СП-32 и СП-34 – СП-37 (рис. 3 и 4). Эмпирическая формула дает хорошее соответствие со всеми данными, кроме данных СП-37. Расчетные значения толщины льда на этой станции заметно (до 10 %) превышают измеренные величины. Выяснение причины таких расхождений требует проведения дополнительных исследований.

На рис. 5 приведен график зависимости приращения толщины льда в каждой точке ледового полигона СП-38 за девять месяцев наблюдений от средней толщины снежного покрова в этой точке. Как подтверждает график, снежный покров экранирует проникновение холода ко льду и замедляет рост его толщины.

На рис. 6 приведены график скорости нарастания льда в период с ноября 2010 г. по середину июня 2011 г. (тренд удален) и график средней скорости подледных течений. Коэффициент корреляции, равный 0,5, является статистически значимым, что указывает на связь скорости нарастания льда и скорости подледного течения. Не

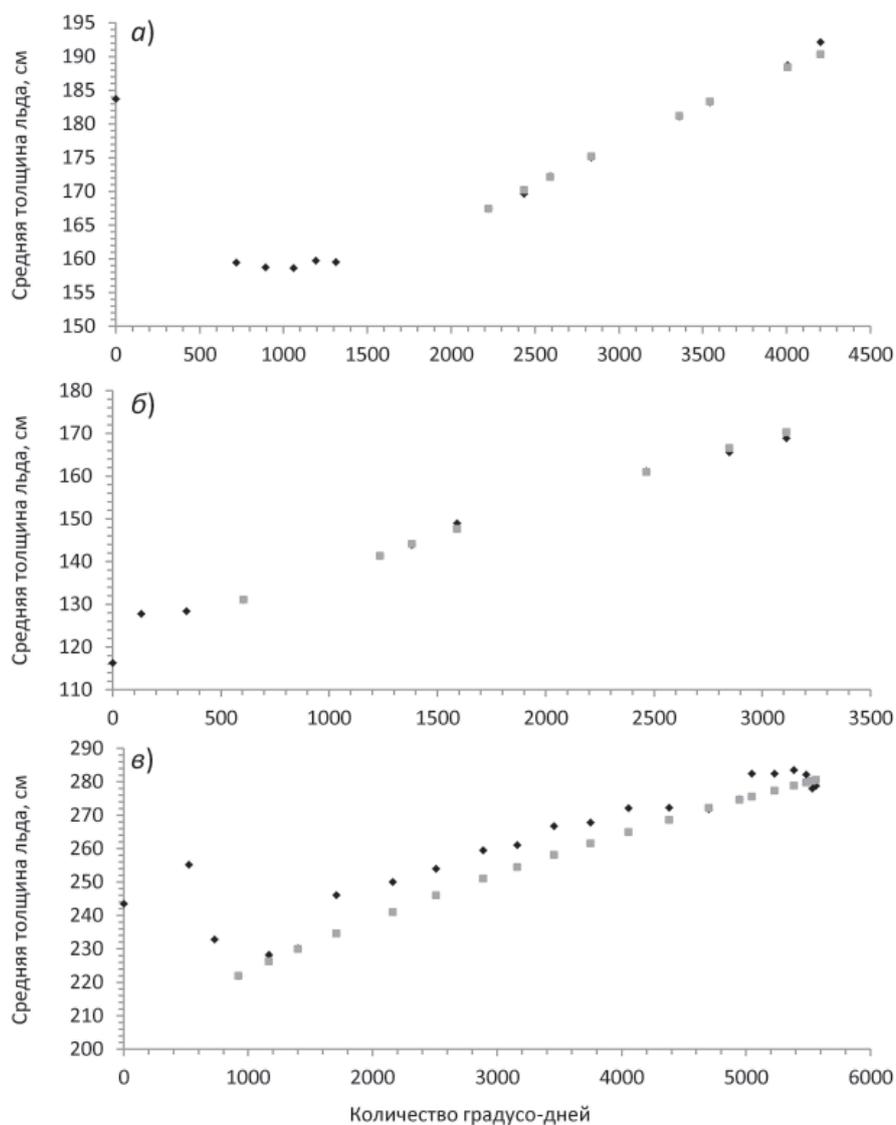


Рис. 3. Изменение средней толщины льда на ледовых полигонах дрейфующих станций СП в зависимости от количества градусо-дней мороза, прошедших с начала наблюдений: а – СП-32, б – СП-34, в – СП-35.

наблюдается связи скорости нарастания льда и средней скорости ветра (коэффициент корреляции равен 0,1).

На рис. 7 приведен график средней толщины снежного покрова на ледовом полигоне СП-38. Необходимо учесть, что данные о средней толщине снежного покрова являются оценочными, т. к. из-за того, что высота снежного покрова измерялась по меткам на рейках-реперах, рядом с которыми проводилось бурение скважин, ледяная

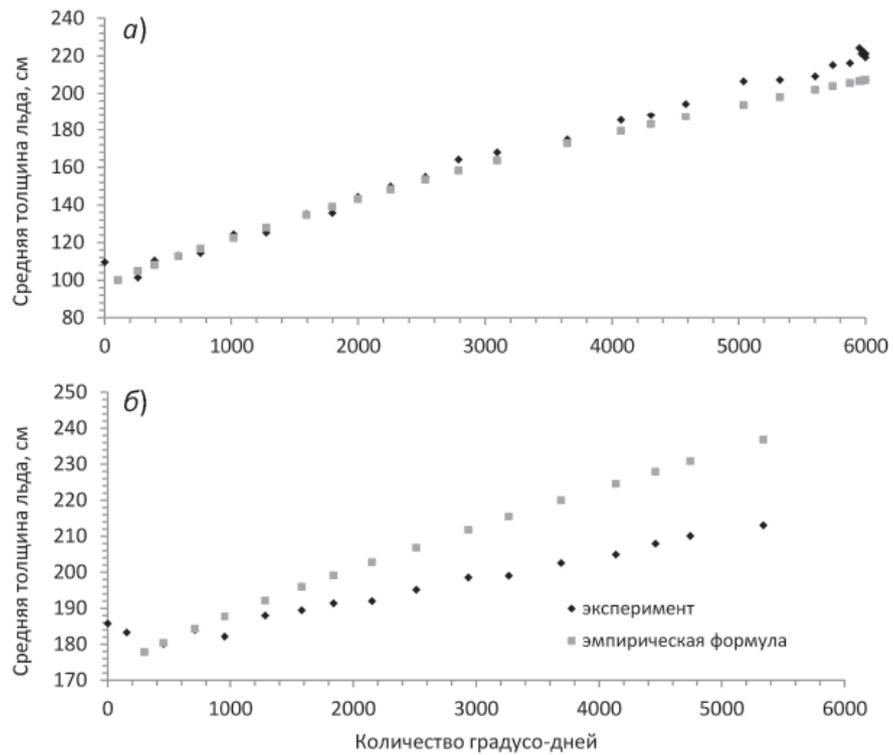


Рис. 4. Изменение средней толщины льда на ледовом полигоне дрейфующей станций СП-36 (а) и СП-37 (б) в зависимости от количества градусо-дней мороза, прошедших с начала наблюдений.

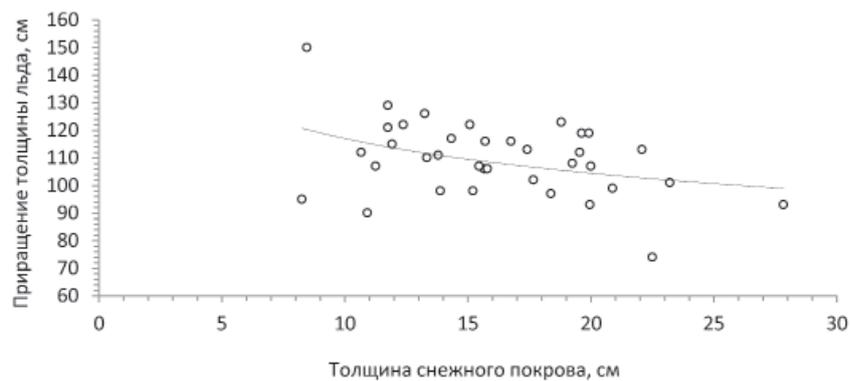


Рис. 5. Зависимость приращения толщины льда в каждой точке ледового полигона СП-38 за девять месяцев наблюдений от средней толщины снежного покрова в этой точке. Пунктирная линия показывает степенной тренд.

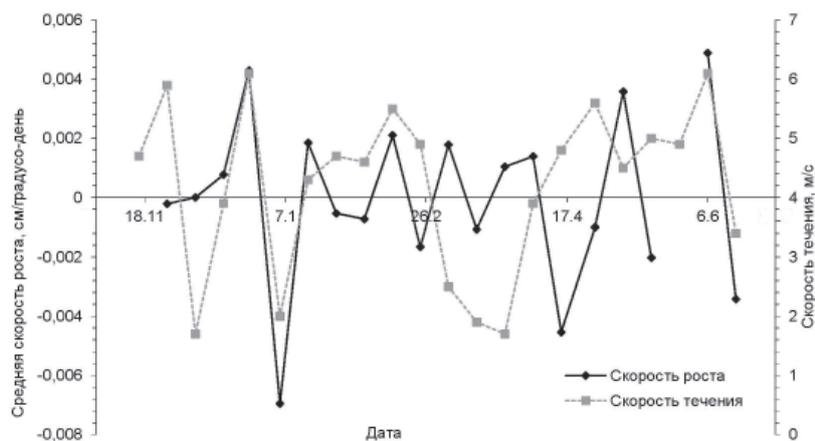


Рис. 6. Скорость нарастания толщины льда на ледовом полигоне СП-38 в период с ноября 2010 г. по середину июня 2011 г. (тренд удален) и средняя скорость подледных течений.

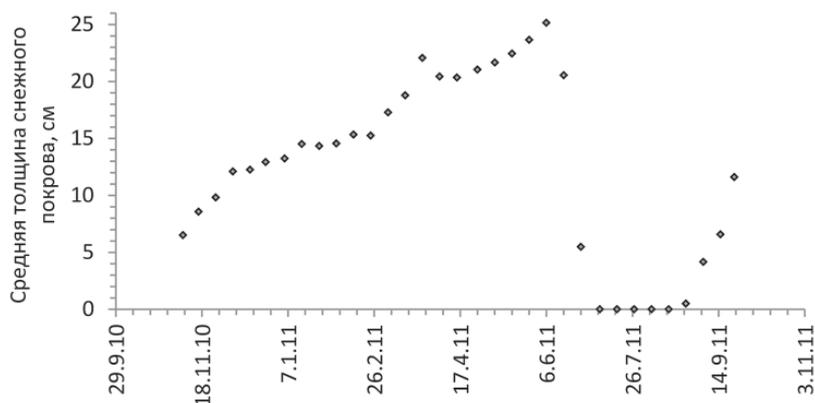


Рис. 7. Средняя толщина снежного покрова на ледовом полигоне СП-38.

стружка, пропитанная морской водой, после измерений замерзала и искажала естественную картину рельефа снежного покрова. График на рис. 7 соответствует графику накопления снега, построенному Лоциловым [1964] на основе многолетних данных.

1 марта 2011 г. была выполнена снегомерная съемка с интервалом 8–9 м вдоль трассы, соединяющей станцию и ВПП, а также вдоль прямой линии, соединяющей западную оконечность ВПП и ледоисследовательскую лабораторию. Всего было сделано 573 измерения. По данным измерений была построена гистограмма распределения толщин снежного покрова (рис. 8а). Средняя толщина снежного покрова составила 20 см, СКО – также 20 см. По методике, приведенной в [Новицкий, Зограф, 1991], была найдена аппроксимирующая кривая, описывающая плотность распределения вероятности толщины снежного покрова (рис. 8б). Такой кривой явилась экспонента

$$p(x) = 0,56 \cdot \exp(-x/18).$$

Проведенные исследования позволили получить новые данные о ледяном покрове центральной части Арктического бассейна. После выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

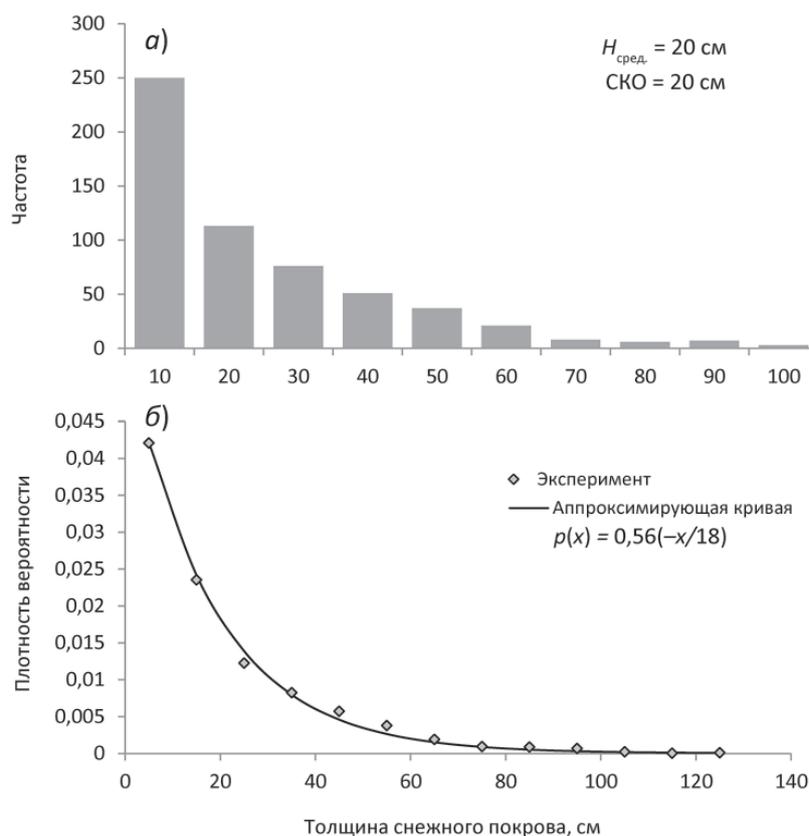


Рис. 8. Гистограмма распределения толщины снежного покрова в районе СП-38 1 марта 2011 г. (а) и ее аппроксимация (б).

- приращение средней толщины остаточного однолетнего льда при увеличении его возраста на один год оценивается в 50 см;
- расчетные значения толщины льда, наиболее близкие к экспериментальным данным, дает формула Ю.П.Доронина с эмпирическими коэффициентами, предложенными Н.П.Шестериковым;
- коэффициент корреляции скорости нарастания льда и скорости подледного течения, равный 0,5, является статистически значимым, что указывает на связь скорости нарастания льда и скорости подледного течения;
- зима 2010/11 г. в районе дрейфа СП-38 была малоснежной, средняя толщина снежного покрова на ледовом полигоне не превышала 26 см;
- данные о средней толщине снежного покрова являются оценочными, т. к. из-за того, что высота снежного покрова измерялась по меткам на рейках-реперах, рядом с которыми проводилось бурение скважин, ледяная стружка, пропитанная морской водой, после измерений замерзала и искажала естественную картину рельефа снежного покрова.

В заключение автор выражает благодарность З.М.Гудковичу за ценные критические замечания, позволившие улучшить данную статью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Доронин Ю.П.* К вопросу о нарастании морского льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1959. № 1. С. 73–79.
- Доронин Ю.П.* Рост и таяние морского льда // Морской лед. Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий: Справочное пособие. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. С. 107–125.
- Кузнецов И.М., Гарманов А.Л.* О практическом использовании формул для расчета толщины морского льда // Метеорология и гидрология. 1987. № 11. С. 116–120.
- Кузьмин П.П.* Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
- Лоцилов В.С.* Снежный покров на льдах Центральной Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 1964. № 17. С. 36–45.
- Николаева А.Я., Шестериков Н.П.* Метод расчета ледовых условий (на примере моря Лаптевых) // Труды ААНИИ. 1970. Т. 292. С. 143–217.
- Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.
- Шестериков Н.П.* Некоторые особенности нарастания припайного льда в районе Мирного // Проблемы Арктики и Антарктики. 1963. № 13. С. 19–26.

V.V.KHARITONOV

SOME RESULTS OF MEASUREMENT OF LEVEL ICE THICKNESS AT «NORTH POLE-38» DRIFTING STATION

The paper presents the results of measurement of level ice thickness conducted in 2010–2011 at «North Pole-38» drifting station. Data is analyzed in comparison with previous expedition data. Empirical formulae of estimation of level ice thickness versus snow thickness and day-degrees approximate the data collected rather well. The graphs show a correspondence between calculated and measured values of level ice thickness. The mean thickness growth of residual one-year ice is estimated at 50 cm during the year. Mean value of snow cover thickness at the ice polygon did not exceed the value of 26 cm. Correlation coefficient between growing rate of ice thickness and current velocity under the ice equals 0,5 and is statistically significant. This points the connection between the two characteristics.

Keywords: *level ice thickness, snow cover, NP-38, day-degrees.*