

# Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.467

## Сравнительная оценка и сопоставимость спутниковых и авиационных данных по ледовитости Охотского моря

© 2013 г. В.А. Романюк<sup>1</sup>, Г.Г. Журавлев<sup>2</sup><sup>1</sup>Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск; <sup>2</sup>Томский государственный университет  
ggz50@sibmail.com

Статья принята к печати 4 июля 2013 г.

Дистанционное зондирование, обработка снимков, площадь ледяного покрова, шельф.  
Continental shelf, image processing, remote sensing, sea ice area.

Несмотря на то, что Сахалинский шельф неплохо подготовлен к добыче и организации поставок газа, его освоение осложняется влиянием гидрометеорологических факторов и в первую очередь ледяным покровом акватории. При получении информации о ледяном покрове используют разные методы, каждый из которых имеет свои особенности и ограничения. Поэтому необходима их сравнительная оценка. В статье рассматриваются спутниковые и авиационные данные по ледовитости Охотского моря для зимних сезонов, полученные параллельно в 1970–1991 гг. Согласованность этих данных весьма высока – коэффициент корреляции за рассматриваемый период  $R = 0,96$ . Разность между спутниковыми и авиационными наблюдениями в Охотском море в этот период составляла в среднем 120,2 тыс. км<sup>2</sup> (7,5% площади моря).

### Введение

При проектировании и эксплуатации платформ на шельфе необходимы информация о гидрометеорологической и ледовой обстановках, а также обобщённые сведения о пространственно-временных характеристиках основных климатических величин и морского льда за длительный период. Наблюдения за льдами с самолётов, вертолётов и искусственных спутников Земли (ИСЗ) восполняют недостатки судовых и прибрежных измерений благодаря одновременному охвату значительных акваторий моря или всего моря в целом. Эти наблюдения и служат основным материалом при разработке таких методов ледовых прогнозов для открытых районов моря, как прогноз положения кромки льда и его дрейфа, ледовитости, протяжённости ледовой трассы, сроков очищения районов моря ото льда [16]. Получение необходимой информации тесно связано с использованием различных технологий по обработке многолетних рядов спутниковых, аэровизуальных и наземных наблюдений. Каждый из этих способов получения информации имеет свои особенности и ограничения и не лишён ошибок. В процессе оценки достоверности и точности визуальных авиационных ледовых наблюдений необходимо учитывать технологию их выполнения и точность самолётовождения в тот или иной период [3, 17]. При построении карт и оценке ледовитости по визуальным

авиационным наблюдениям возникают ошибки в определении границы распространения льда, при интерполяции их положения и др. Дешифрование космических изображений для создания тематических карт позволяет представить данные в единой картографической проекции, комбинировать данные, полученные в разных спектральных диапазонах (космических изображений ИСЗ МЕТЕОП-3М, TERRA, AQUA, NOAA, ERS-2, Envisat, IRS, QuikSCAT, TOPEX/Poseidon и др). Однако при дешифрировании подобных снимков также возникают ошибки, которые не всегда можно исключить [5].

Применяемые способы наблюдений за ледяным покровом на дальневосточных морях по времени можно разделить на три этапа [10]: первый – попутные (нерегулярные) морские наблюдения с 1928 по 1960 г.; второй – регулярные авиационные наблюдения с 1957 по 1992 г.; третий – спутниковые наблюдения с 1970-х годов по настоящее время. На каждом этапе наблюдения были различны как по масштабам, так и по точности определения пространственных характеристик. На первом этапе исследований (эпизодические судовые и единичные авиационные наблюдения) А.Н. Крындин [4] оценивает ошибку расчётов в 10% оценённой площади ледяного покрова. На втором этапе, по результатам учащённых авиационных наблюдений, впервые были получены на-

дёжные сведения о скоростях смещения границ дрейфующих льдов, которые могут достигать 30 миль/сутки и более. Впоследствии, на третьем этапе, эти данные были подтверждены при дешифрировании спутниковых снимков.

Исходя из современных знаний об изменчивости режима ледяного покрова дальневосточных морей, площадь льда, вычисленная по местоположению ледовых кромок, не может быть объективным показателем как в силу своей значительной синоптической изменчивости, так и дискретности самих наблюдений [10]. Также показано, что в зависимости от направления и продолжительности ветрового воздействия смещение кромок в различных частях моря может одновременно происходить в разные стороны, при этом ледовитость моря в целом изменяется незначительно.

Преобладающий тип атмосферной циркуляции вместе с термическими условиями — это основные факторы, определяющие ледовитость моря в каждый конкретный ледовый сезон. Согласно результатам выполненных расчётов, на разных стадиях существования ледяного покрова 30-мильное смещение кромки может составлять от 5 до 60% его площади соответственно в периоды максимальной и начальной (конечной) стадий развития. Следующий фактор, влияющий на точность определения площади ледяного покрова, — его сплочённость. Если этот фактор не учитывается, то дополнительная ошибка в определении истинной площади составляет от 3–5% в начале ледового сезона до 10–15% в конце, в период его максимального развития. К этому следует добавить инструментальную ошибку вычисления площадей для ледовых карт определённых масштабов, которая, по оценкам [10], варьирует от 3 до 7%; при этом суммарная ошибка вычисления площадей может быть до двух раз больше по сравнению с заявленной в работе [4].

Спутниковые наблюдения не могут полностью заменить визуальные самолётные, так как не все элементы ледяного покрова определяются с необходимой точностью. Кроме того, дешифрирование снимков в значительной степени зависит от индивидуальных особенностей специалиста. Поэтому для комплексного использования данных о ледовитости, полученных разными методами, требуется сопоставление результатов этих наблюдений. Данная проблема и была предметом нашего исследования. Цель работы — сравнительная оценка спутниковых и авиационных данных по ледовитости Охотского моря, полученных в период одновременного проведения подобных наблюдений с 1970 по 1991 г. Для выполнения поставленной задачи требовалось собрать и обработать материалы ледовых

и авиационных наблюдений, а также выполнить сравнительный анализ спутниковых и авиационных данных по площади льда Охотского моря.

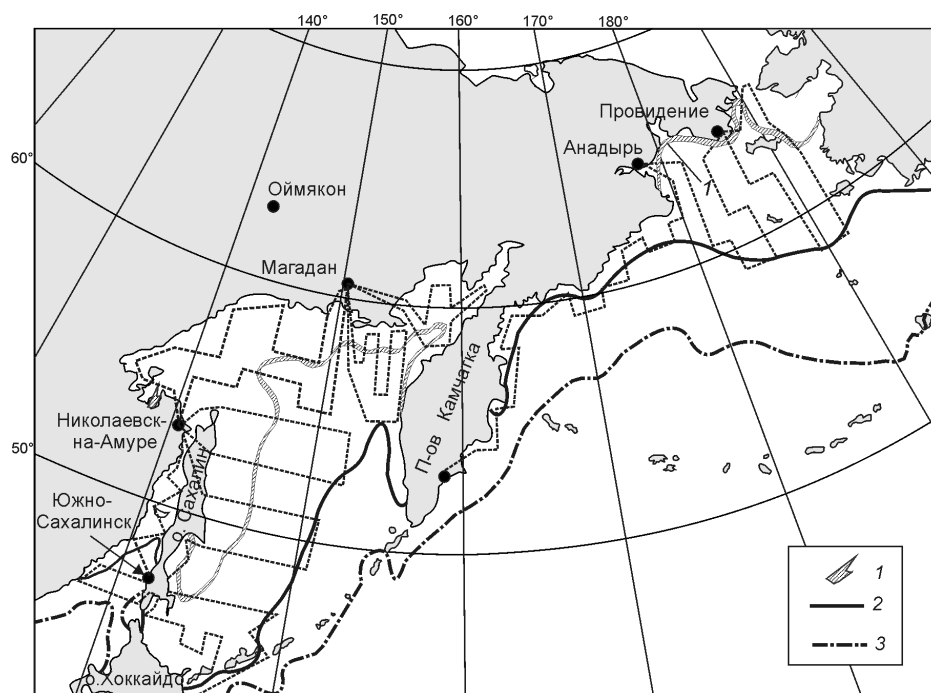
### Исходные данные и методы их обработки

Для исследования использованы данные регулярных спутниковых и авиационных наблюдений для Охотского моря за период с 1970 по 1991 г. Ледовые авиационные разведки проводились планомерно один раз в декаду с ноября по июнь и равномерно покрывали галсами всю заполненную дрейфующим льдом акваторию моря (рис. 1) [11]. Все карты ледовой обстановки, включая данные прибрежных наблюдений гидрометеорологических станций и постов, усреднялись для данной декады по всему морю. Таким образом, минимальная дискретность карт ледовой обстановки составляла одну декаду. Определённые на их основе характеристики ледяного покрова были эквидистантны, что позволило получить надёжные статистические характеристики. В исходный ряд наблюдений вошли данные ежемесячных значений ледовитости Охотского моря.

Спутниковые данные для исследуемого района получены как с российских искусственных спутников Земли серий NOAA, МЕТЕОР, КОСМОС, так и с зарубежных, которые регулярно выставляются Национальными центрами обработки гидрометеорологической информации Японии (Japan Meteorological Agency) и США (National/Naval Ice Center) в Интернете [12–15]. Минимальная дискретность карт-схем ледовой обстановки по спутниковым данным составляла 3–4 суток. В исходные ряды включены данные только с месячной дискретностью, вычисленные как среднеарифметические по результатам всех съёмки, выполненных во второй декаде каждого календарного месяца ледового сезона в период с 1970/71 по 1990/91 г.

### Результаты обработки данных

Для оценки статистических характеристик рядов спутниковых и авиационных наблюдений использовались стандартные методы описательной статистики [1, 2, 6–9]. Расчёты вели с помощью программы Statistica 6.0. Результаты расчёта характеристик площади льда, полученные по данным спутниковых и авиационных наблюдений, приведены в табл. 1. Асимметрия  $A_s$  в рассматриваемых выборках имеет небольшое отрицательное значение, что свидетельствует о правосторонней асимметричности распределения; в этом случае среднее значение меньше медианы  $Me$ . В рассматриваемых рядах эксцесс также имеет отрицательные значения, т.е. кривые распре-



**Рис. 1.** Карта галсов авиационной ледовой разведки Охотского моря [11]:

1 – граница наименьшего распространения льда; 2 – граница среднего многолетнего распространения льда; 3 – граница наибольшего распространения льда

**Fig. 1.** Map of aerial ice reconnaissance tracks of the Sea of Okhotsk [11]:

1 – boundary of the smallest distribution of ice; 2 – boundary long-term average distribution of ice; 3 – boundary greatest extent of ice

**Таблица 1.** Статистические характеристики площади ледяного покрова Охотского моря по авиационным и спутниковым наблюдениям в 1970–1991 гг.

Характеристики	Наблюдения	
	авиационные	спутниковые
Средняя площадь, тыс. км <sup>2</sup>	794,0	700,2
Медиана $M_e$	825,0	755,0
Стандартное отклонение $\sigma_x$	406,7	372,4
Асимметрия $A_s$	-0,07	-0,06
Экссесс $E$	-1,28	-1,32
Коэффициент вариации $C_v$ , %	51,2	53,2

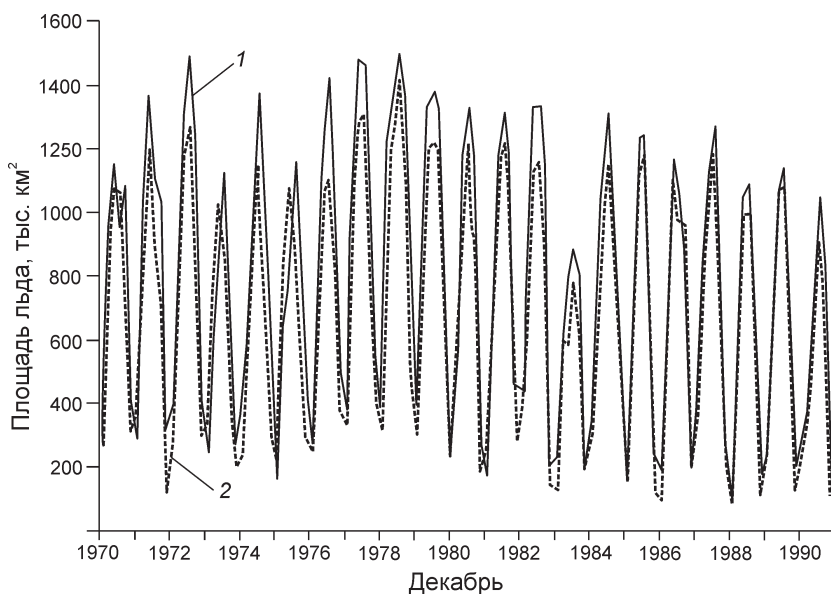
деления ниже и положе по сравнению с нормальной кривой распределения.

Для проверки нормальности рядов использовался  $\chi^2$  – критерий Пирсона. Значение  $\chi^2$  для ряда авиационных наблюдений составило 51,4 (число степеней свободы  $df = 11$ , вычисленный уровень значимости  $p < 0,05$ ); для спутниковых – 42,2 ( $df = 9$ ,  $p < 0,05$ ). Гипотеза о нормальности была отклонена. Аналогичные результаты получены и при использовании критерия Колмогорова–Смирнова. Для проверки однородности использовался непараметрический критерий Манна–Уитни. Расчёт однородности средних значений для независимых выборок показал, что они однородны при уровне значимости  $p = 0,05$ .

На рис. 2 показана динамика площади льда Охотского моря, рассчитанная по данным спутниковых и авиационных наблюдений за период с 1970 по 1991 г. с

месячной дискретностью. Анализ графика показывает хорошую согласованность результатов спутниковых и авиационных наблюдений. Для оценки сопоставимости данных о ледовой обстановке, полученных из разных источников (авиаразведка, дешифрованные спутниковые снимки), проводился их корреляционно-регрессионный анализ. В расчётах использовались ряды за весь рассматриваемый период.

Коэффициента корреляции Пирсона  $R = 0,96$ , что свидетельствует о сильной связи между рассматриваемыми рядами. Для проверки гипотезы о значимости регрессии использовался  $F$ -критерий. Его значение, равное 1532, и вычисленный уровень значимости  $p < 0,05$  показывают, что построенная регрессия высоко значима. Для визуального исследования зависимости между спутниковыми и авиационными наблюдениями построена двумерная диаграмма рассеяния, которая даёт больше информации, чем простое значение коэффициента корреляции. Другое важное преимущество диаграмм рассеяния состоит в том, что они позволяют находить «выбросы» (нетипичные данные), которые искусственным образом увеличивают или уменьшают («смещают») коэффициент корреляции. На рис. 3 дана диаграмма рассеяния, на которой приведены уравнение регрессии и коэффициент детерминации. Она показывает, что переменные тесно связаны, большинство точек «ложатся» вдоль прямой линии, задаваемой определённым уравнением, причём в данных нет «выбросов», которые могут значительно изменить коэффициент корреляции.

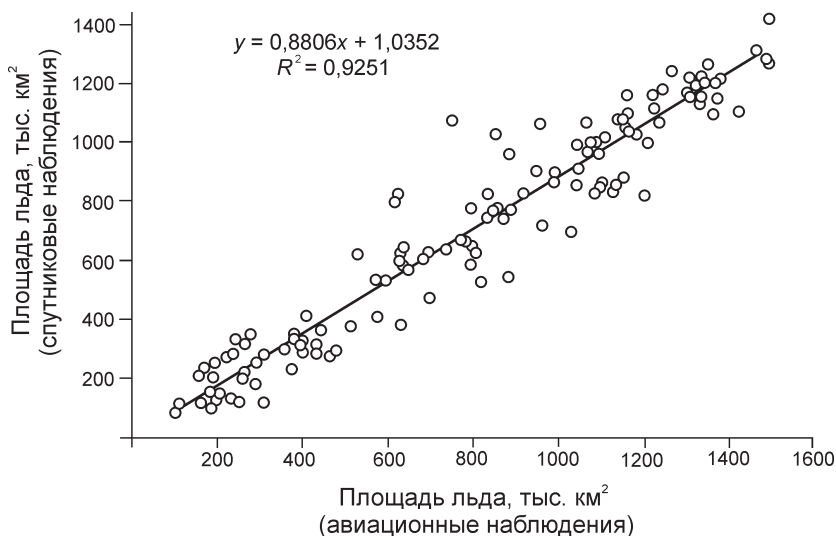


**Рис. 2.** Площадь ледяного покрова, вычисленная по спутниковым и авиационным наблюдениям за период с 1970 по 1991 г.:

1 – авиационные наблюдения; 2 – спутниковые наблюдения

**Fig. 2.** The area of ice cover estimated from satellite and aerial observations data, 1970–1991:

1 – aerial observations; 2 – satellite observations



**Рис. 3.** Диаграмма рассеяния для рядов спутниковых и авиационных наблюдений за период с 1970 по 1991 г.

**Fig. 3.** Scatter plot of satellite and aerial observations data series, 1970–1991

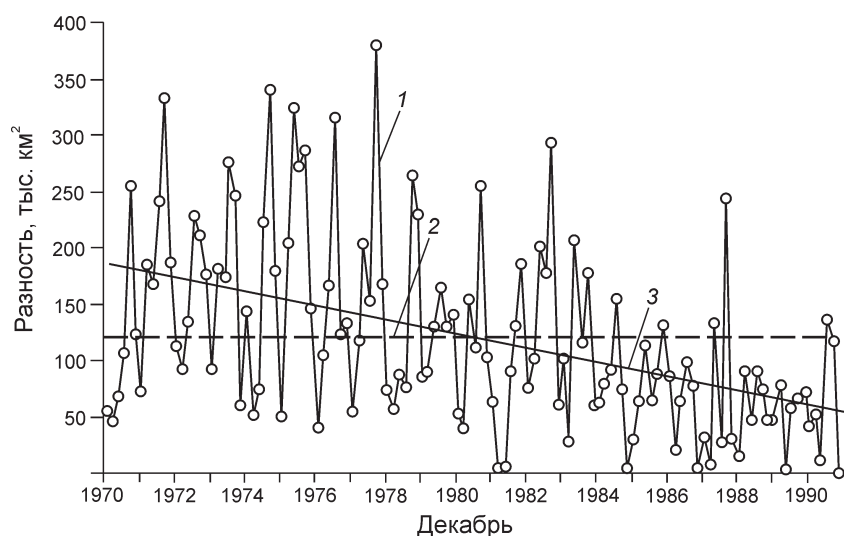
Для оценки расхождений в данных по определению площади льда между спутниковыми и авиационными наблюдениями рассмотрены их различия. Анализ показал, что в большинстве случаев разность значений между авиационными и спутниковыми наблюдениями положительная (значения площади льда по авиационным наблюдениям выше значений по спутниковым), лишь в 18 случаях (1,4%) наблюдалась обратная ситуация. На рис. 4 показана абсолютная разность значений между площадями льда, вычисленными по данным спутниковых и авиационных наблюдений. Пунктирной линией обозначено среднее значение разности за рассматриваемый период. Линейный тренд (сплошная линия) показывает тенденцию к уменьшению различий в данных этих двух видов наблюдений,

что, по-видимому, можно объяснить совершенствованием технологий получения и обработки данных.

#### Анализ расхождений по месяцам

**Декабрь.** Среднее расхождение данных спутниковых и авиационных наблюдений в декабре составило 65,2 тыс. км<sup>2</sup> (4,1% площади моря). Наибольшее расхождение отмечалось в декабре 1975 г., когда данные спутниковых и авиационных наблюдений отличались на 142 тыс. км<sup>2</sup> (8,9% площади моря). Наименьшее расхождение данных было в декабре 1989 г. – 14,4 тыс. км<sup>2</sup>, что соответствует 0,9% площади акватории Охотского моря.

**Январь.** Среднее расхождение данных спутниковых и авиационных наблюдений в январе – 79,8 тыс. км<sup>2</sup> (5% площади моря). Наибольшее



**Рис. 4.** Абсолютная разность площади ледяного покрова, вычисленная по спутниковым и авиационным наблюдениям за период с 1970 по 1991 г.:

1 – разность; 2 – средняя разность за рассматриваемый период; 3 – линейный тренд разности

**Fig. 4.** Absolute difference of the ice cover area series from satellite and aerial observations data, 1970–1991:

1 – difference; 2 – average difference for the considered period; 3 – linear trend of a difference

расхождение было в январе 1976 г., когда данные спутниковых и авиационных наблюдений отличались на 203,3 тыс. км<sup>2</sup> (12,7% площади моря). Минимум отмечен в январе 1982 г. – 3,3 тыс. км<sup>2</sup> (0,2% площади моря).

**Февраль.** Среднее расхождение данных в феврале равно 121,3 тыс. км<sup>2</sup> (7,6% площади моря). Наибольшее расхождение отмечалось в феврале 1976 г. – 323,3 тыс. км<sup>2</sup> (20,2% площади моря); минимальное – в феврале 1990 г., когда данные спутниковых и авиационных наблюдений совпали.

**Март.** Среднее расхождение данных наблюдений составило 150,8 тыс. км<sup>2</sup> (9,4% площади моря). Наибольшее расхождение отмечалось в марте 1977 г., когда данные наблюдений отличались на 315,6 тыс. км<sup>2</sup> (19,7% площади моря). Наименьшее расхождение в марте было в 1988 г. – 26,7 тыс. км<sup>2</sup>, что соответствует 1,7% площади акватории Охотского моря.

**Апрель.** Среднее расхождение данных в это время составило 197,9 тыс. км<sup>2</sup> (12,3% площади моря). Наибольшее расхождение отмечено в апреле 1978 г., когда данные спутниковых и авиационных наблюдений отличались на 380 тыс. км<sup>2</sup> (23,7% площади моря); наименьшее расхождение было в апреле 1990 г. и составляло 66,7 тыс. км<sup>2</sup> (4,2% площади акватории Охотского моря).

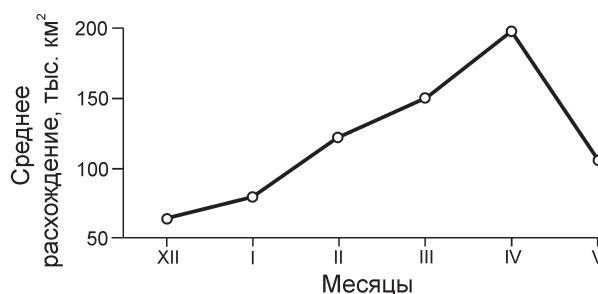
**Май.** Среднее расхождение данных спутниковых и авиационных наблюдений было равно 105,9 тыс. км<sup>2</sup> (6,6% площади моря). Наибольшее расхождение отмечалось в ледовый сезон 1978/79 г. (май 1979 г.), когда данные этих двух видов наблюдений различались между собой на 228,9 км<sup>2</sup> (14,3% площади моря). Наименьшее расхождение в мае отмечено в 1990 г., когда данные наблюдений совпали.

**Таблица 2.** Расхождение данных спутниковых и авиационных наблюдений в Охотском море с 1970 по 1991 г.\*

Расхождение данных	Месяцы						Среднее за сезон
	XII	I	II	III	IV	V	
Среднее	65,2	79,8	121,3	150,8	197,9	105,9	120,2
	4,1	5,0	7,6	9,4	12,3	6,6	7,5
Минимальное	14,4	3,3	0	26,7	66,7	2,2	18,5
	0,9	0,2	0	1,7	4,2	0	1,2
Максимальное	142,2	203,3	323,3	315,6	380,0	228,9	265,6
	8,9	12,7	20,2	19,7	23,7	14,3	16,6

\*В числителе дано расхождение в тыс. км<sup>2</sup>, в знаменателе – в % от площади общей акватории.

В табл. 2 приведены значения характеристик, полученные с помощью спутниковых и авиационных наблюдений в Охотском море. По данным табл. 2 построен график средней величины расхождения по месяцам сезона (рис. 5).



**Рис. 5.** Сезонный ход средней величины расхождения ледовитости между авиационными и спутниковыми данными за период с 1970 по 1991 г.

**Fig. 5.** Seasonal variation of average difference of ice coverage estimated from aerial and satellite data, 1970–1991

### Выводы

1. Разность значений ледовитости, рассчитанной по спутниковым и авиационным наблюдениям в Охотском море, в среднем за 1971–1991 гг. составляет 120,2 тыс. км<sup>2</sup> (7,5% площади моря) с колебаниями средних значений за сезон от 18,5 до 265,6 тыс. км<sup>2</sup>.

2. Корреляционно-регрессионный анализ рядов ледовитости, полученных по данным спутниковых и авиационных наблюдений по Охотскому морю, показал их высокую коррелированность. Коэффициент корреляции для всего рассматриваемого периода  $R = 0,96$ , коэффициент детерминации  $R^2 = 0,92$ . Построенная регрессия высоко значима.

3. Ряды наблюдений ледовитости Охотского моря, выполненных разными методами, имеют хорошую сопоставимость и могут использоваться совместно для дополнения друг друга и создания комплексной, уточнённой карты ледовой обстановки.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 11-05-90756-моб\_ст и при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (Госконтракт № 8345).

### Литература

1. Берестнева О.Г., Марухина О.В., Шевелёв Г.Е. Прикладная математическая статистика. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2012. 200 с.
2. Вербная В.П., Моцная В.П. Математика: Ч. 8. Математическая статистика. Новосибирск: изд. СГГА, 2009. 65 с.
3. Карелин Д.Б., Волков Н.А., Шадринский В.В., Гордиенко П.А. Ледовая авиационная разведка. М.: изд. Главсевморпути, 1946. 152 с.
4. Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и кромки льда на дальневосточных морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН. 1964. Вып. 71. С. 5–83.
5. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: Аспект Пресс, 204. 184 с.
6. Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. М.: Мир, 1967. 144 с.
7. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968. 248 с.
8. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
9. Орлов А.И. Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2004. 672 с.
10. Пищальник В.М., Иванов В.В., Трусков П.А. К вопросу составления долгосрочного прогноза колебаний площади

льда в Охотском море // Мореходство и морские науки–2011: Избр. докл. III Сахалинской регион. морской науч.-техн. конф. 15–16 февраля 2011 г. Южно-Сахалинск: Изд-во Сахалинского гос. ун-та, 2011. С. 227–241.

11. Плотников В.В., Якунин Л.П. Ледовые условия и методы их прогнозирования // Проект «Моря»: Гидрология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорол. условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. С. 291–340.
12. Романюк В.А., Пищальник В.М. Технология создания гидрометеорологической базы данных на основе доступных Интернет-ресурсов // География: Проблемы науки и образования. Материалы междунар. науч.-практ. конф. 22–24 апреля 2010 г., Санкт-Петербург. СПб.: Полиграф-Ресурс, 2010. С. 59–61.
13. Романюк В.А., Мелкий В.А., Пищальник В.М., Минервин И.Г., Гальцев А.А. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей и морфометрические данные выделенных акваторий // VII Всерос. симпозиум «Физика геосфер». Материалы докладов. Владивосток, 5–9 сентября 2011 г. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 165–173.
14. Романюк В.А., Минервин И.Г., Пищальник В.М., Мелкий В.А., Гальцев А.А., Дорофеева Д.В., Литвиненко А.А. Анализ причин формирования экстремальных ледовых условий в Охотском море // Там же. С. 174–182.
15. Романюк В.А., Пищальник В.М., Минервин И.Г., Дорофеева Д.В., Гальцев А.А. Исследования влияния сроков смены сезонов на ледовитость Охотского и Японского морей // Там же. С. 218–224.
16. Руководство по морским гидрологическим прогнозам. СПб.: Гидрометеоздат, 1994. 525 с.
17. Руководство по производству ледовой авиаразведки. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 240 с.

### Summary

Information on the sea ice coverage is one of the most important for the development of the Sakhalin shelf. The paper deals with the evaluation of ice extent estimations in the Sea of Okhotsk based on data of the remote sensing and aerial observations in winter seasons 1970–1991. The analysis has revealed the average seasonal difference in satellite and aerial ice series is 120.2 thousand km<sup>2</sup> (7.5% of the sea area). Ranges of changes of average values of a difference for a season has made from 18.5 to 265.6 square kilometers. The satellite and aerial sea ice extent data are strongly correlated ( $R = 0.96$ ) with high significance for all period considered. The results obtained suggest that the series of observations of ice cover of the Sea of Okhotsk, made by different methods, have good comparability and can be used together to complement each other and produce an integrated and refined sea ice maps.