

УДК 51-7:004.94

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИКИ

¹Зеленина Л.И., ¹Хаймина Л.Э., ¹Деменкова Е.А., ²Федькушова С.И.,
¹Хаймин Е.С., ¹Деменков М.Е.

¹ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»,
Архангельск, e-mail: l.zelenina@narfu.ru, l.khaimina@narfu.ru, e.demenkova@narfu.ru,
e.khaymin@narfu.ru, m.demenkov@narfu.ru;

²ГАПОУ АО «Архангельский торгово-экономический колледж», Архангельск, e-mail: sif-7@yandex.ru

В статье рассмотрена методика, позволяющая прогнозировать изменение ледяного покрова Арктики средствами спутниковой съемки. Мониторинг состояния арктических морей позволяет провести оценку последствий их изменения. Так, изменение морского ледяного покрова может привести к изменениям возможности доступа к ресурсам на шельфе арктических морей, изменениям сроков и условий навигации, изменению степени геокриологического риска (риска нарушений в сооружениях, связанного с процессами в вечной мерзлоте). Использование технологии дистанционного зондирования Земли позволяет увеличить охват анализируемых и изучаемых данных. Применение эффективных методик анализа и обработки данных помогает повысить скорость получения актуальной информации. Результатом исследования стала разработка алгоритма мониторинга и моделирования изменений льдов Арктики. В процессе исследования осуществлен обзор существующих решений и инструментальных средств, используемых при мониторинге ледяного покрова; разработан алгоритм моделирования уровня ледяного покрова; на основе различных методов построения моделей временного ряда и искусственных нейронных сетей выполнены краткосрочные и долгосрочные прогнозирование в исследовании динамики льдов Арктики на основе полученных данных. Разработанная методика может быть использована для изучения ледового режима морей в Арктике.

Ключевые слова: моделирование временных рядов, нейронные сети, адекватность модели, морские льды, картографические источники

DEVELOPMENT OF METHODS FOR MODELING CHANGES IN THE ARCTIC ICE COVER

¹Zelenina L.I., ²Khaymina L.E., ¹Demenkova E.A., ²Fedkushova S.I.,
¹Khaymin E.S., ¹Demenkov M.E.

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk,
e-mail: l.zelenina@narfu.ru, l.khaimina@narfu.ru,
e.demenkova@narfu.ru, e.khaymin@narfu.ru, m.demenkov@narfu.ru;

²Arkhangelsk Trade and Economic College, Arkhangelsk, e-mail: sif-7@yandex.ru

The article discusses a methodology for predicting changes in the ice cover of the Arctic using satellite imagery. Monitoring the state of the Arctic seas makes it possible to assess the consequences of their change. Thus, a change in the sea ice cover can lead to changes in the possibility of access to resources on the shelf of the Arctic seas, changes in the timing and conditions of navigation, a change in the degree of geocryological risk (the risk of disturbances in structures associated with processes in permafrost). The use of earth remote sensing technology makes it possible to increase the coverage of analyzed and studied data. The use of effective methods for analyzing and processing data helps to increase the speed of obtaining relevant information. The result of the study was the development of an algorithm for monitoring and modeling changes in Arctic ice. In the course of the study, a review of existing solutions and tools used in monitoring the ice cover was carried out; an algorithm for modeling the ice cover level has been developed; On the basis of various methods for constructing time series models and artificial neural networks, short-term and long-term forecasting has been carried out in the study of the dynamics of the Arctic ice on the basis of the data obtained. The developed technique can be used to study the ice regime of the seas in the Arctic.

Keywords: time series modeling, neural networks, model adequacy, sea ice, cartographic sources

Двадцать первый век – век космического освоения, в котором процесс дистанционного зондирования получает все большее применение. Информация, получаемая с космических носителей, используется для формирования баз данных геоинформационных систем. Получаемые с космических аппаратов и спутников снимки отличаются детальностью отображения исследуемых объектов в различных спектральных диапазонах.

В России уделяется значительное внимание мониторингу арктических морей. Обусловлено это необходимостью обеспечения выгодного судоходства на Северном морском пути и изучения ледового режима морей в Арктике.

Практически две трети года моря сибирского шельфа Арктики имеют сплоченный ледяной покров, чего нельзя сказать о морях приатлантического сектора Арктики. Поэтому необходимо понимать дальнейшие

перспективы увеличения или уменьшения площади льдов.

Предлагаемая модель, основанная на данных дистанционного зондирования, позволит проанализировать данный вопрос.

Цель исследования: разработка алгоритма мониторинга и моделирования изменений ледяного покрова Арктики.

Обзор картографических источников

В качестве картографических источников использовались радарные и оптические снимки ледового покрытия в районе Карских ворот, предоставленные Центром космического мониторинга Арктики Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова (спутниковые данные были получены с аппаратов Terra/Aqua (США), EROS В (Израиль), SPOT 4/5 (Франция), RADARSAT 1/2 (Канада)).

Карские Ворота – пролив, соединяющий Баренцево и Карское моря и расположенный между островами Новая Земля и Вайгач. Карские ворота являются проходом южного маршрута Северного морского пути. На рис. 1 представлены оптические и радарные снимки района Карских ворот.

Вторым районом исследования является залив Печорская Губа. Печорская губа – крупный залив Печорского моря – юго-восточной части Баренцева моря, на территории Ненецкого автономного округа России. Печорская губа с севера ограничена полуостровом Русский Заворот, с северо-востока – Гуляевскими кошками, с юга – Двойничным носом, к северо-западу и западу – Захарьиным берегом, с юго-запада – дельтой Печоры.

Для определения расположения Печорской Губы были использованы топографические карты [1]:

– карта масштаба 1:1 000 000 (в 1 см – 10 км) R-39,40. о. Колгуев;

– карты масштаба 1:500 000 R-40-А,Б. пролив Карские ворота >> R-40-В,Г. Печорская Губа.

Таким образом, для создания цифровой картографической основы использовались топографическая карта, оптические и радарные снимки (для сверки расположения объектов) [2], также Яндекс-карта (для привязки координат растрового изображения).

Экспериментальная часть

Обработка радарных данных – довольно ресурсоемкий процесс. В связи с этим имеется несколько программных комплексов, позволяющих производить качественную и эффективную обработку радарных данных. Среди ведущих можно выделить такие разработки, как ENVI SARscape, ERDAS IMAGINE RADAR и PHOTOMOD Radar. Данные программные продукты используются для обработки и анализа радарных снимков с последующим выводом необходимых результатов. Для обработки радарных снимков дальнего Севера и Арктических регионов наиболее подходящей явилась разработка компании Exelis VIS – ENVI SARscape.

ENVI SARscape

Программный комплекс SARscape (разработчик – SARMAP, Швейцария; правообладатель – Exelis VIS, США) представляет собой набор дополнительных модулей к программе ENVI [3]. Эти дополнительные модули позволяют выполнять предварительную и тематическую обработку радарных снимков.

Результаты тематической обработки в программном продукте SARscape могут быть использованы для всепогодного мониторинга ледовой обстановки и судоходства (до нескольких раз в сутки).

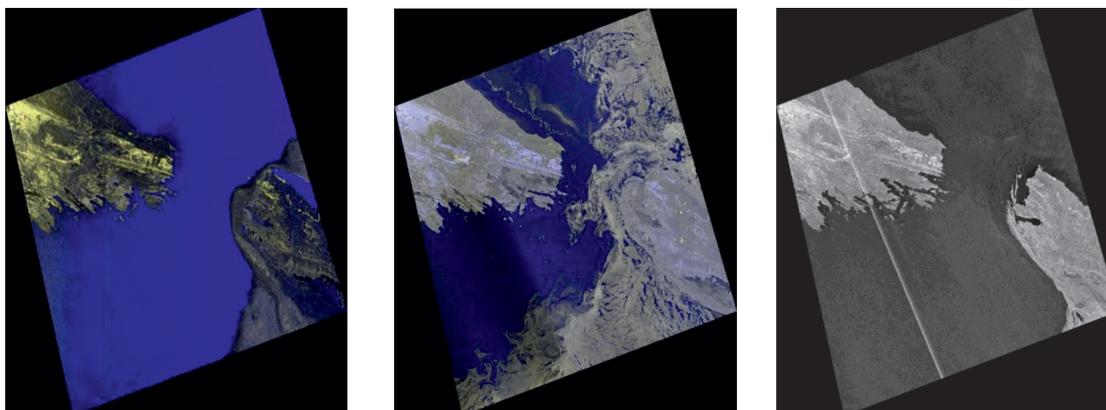


Рис. 1. Оптические (слева и по центру) и радарный (справа) снимки. Карские ворота

Модули SARscape позволяют выполнять такую обработку данных, как фокусировка, импорт комплексных и амплитудных данных, корегистрация, фильтрация (удаление спекл-шумов), извлечение характеристик (включая когерентность), геокодирование, радиометрическая калибровка и нормализация радарных снимков, составление из них бесшовных мозаик, сегментация изображений [4].

Данные радарного снимка импортируются в SARscape в специальный внутренний формат, готовый к дальнейшей обработке в ПО ENVI SARscape. Далее выполняется операция некогерентного накопления (НКН) для устранения эффекта вытягивания. Оно улучшает радиометрическое разрешение радиолокационного снимка за счет ухудшения пространственного разрешения, а также позволяет уменьшить уровень спекл-шума. Результат выполнения операции НКН показан на рис. 2.

Далее идет обработка и фильтрация спекл-шума, представляющего собой беспорядочно и случайно распределенные

по площади снимка резкие яркостные вариации линейными размерами в один пиксель каждая, возникающие из-за когерентного переналожения многократных отражений радиосигнала, характеризующих один и тот же пиксель радарного снимка. Для фильтрации шумов на данном снимке использовался одиночный фильтр типа «Фрост». После работы фильтра было замечено уменьшение уровня спекл-шума и увеличение уровня сглаженности.

В силу присутствия градиента яркостей и особенностей рельефа необходимо выполнить процедуру геокодирования и радиометрической калибровки. Радиометрическая калибровка выполняется с учетом типа ландшафта, диаграммы направленности антенны в направлении дальности и ширины полосы съемки.

Следует отметить, что программное обеспечение ENVI SARscape является мощным и эффективным инструментом для обработки, анализа и расчета параметрических и пространственных данных радарных снимков.

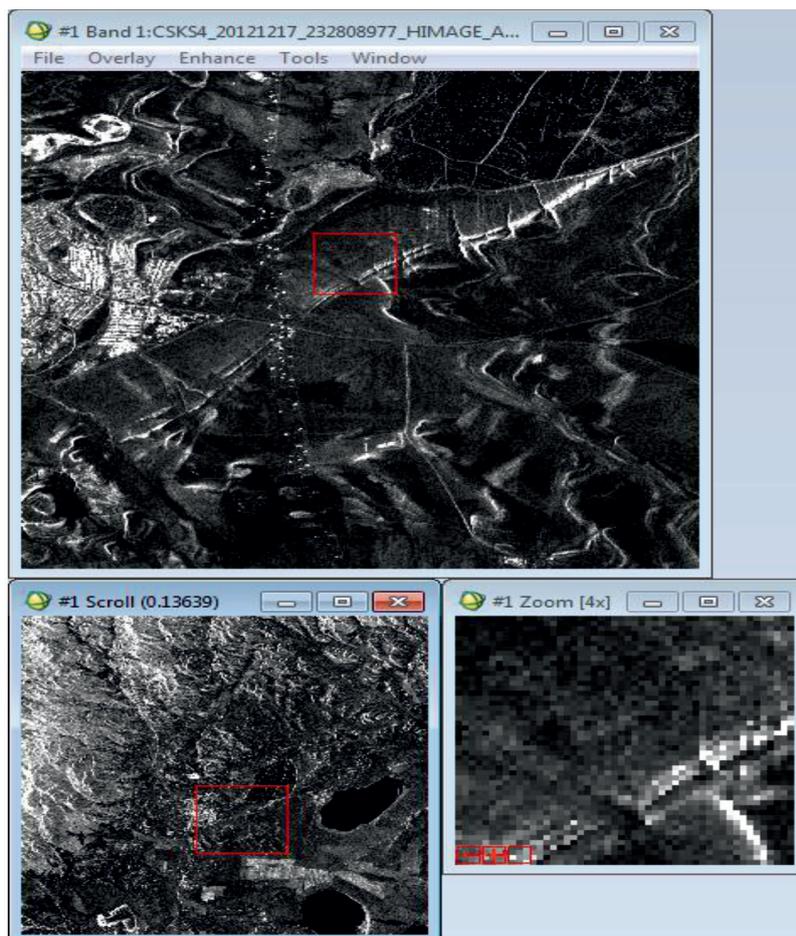


Рис. 2. Результат выполнения НКН

SNAP

Архитектура SNAP состоит из различных наборов инструментов для обработки и анализа радиолокационного изображения.

Основными функциональными возможностями являются:

- *некогерентное накопление*, которое требуется для того, чтобы получить радиолокационный снимок с условным размером пикселя, а также для усреднения разрешения пикселей по дальности и по азимуту или по дальности или по азимуту, при этом повышая радиометрическое разрешение снимка, но ухудшая пространственное разрешение. Результатом этой обработки будет изображение, которое содержит меньше шума и приблизительный квадратный размер пикселя от наклонной дальности у дальности до поверхности земли;

- *корректировка по местности*, геокодирующая радиолокационный снимок для исправления геометрических искажений и использует цифровую модель высот, а также производящая продукт картографической проекции.

При работе с радиолокационными снимками необходимо выполнить операцию калибровки, которая «улучшает» снимки, при этом значение пикселей представляет собой значение обратного рассеяния луча радара от отраженной поверхности. На рис. 3 представлен исходный радиолокационный снимок и результат его калибровки.

Рассматриваемый программный продукт SNAP может быть использован для разархивирования радиолокационных снимков и сохранения в формате TIFF для дальнейшей обработки их в MatLab, поскольку SNAP позволяет сохранить снимок в лю-

бом удобном для пользователя разрешении и формате.

Краткосрочное прогнозирование уровня ледовитости на основе временных рядов

Прогнозирование уровня ледовитости на 1–2 шага вперед по имеющимся данным (временным рядам) можно осуществлять на основе адаптивных моделей.

Продемонстрируем процесс краткосрочного прогноза уровня ледовитости за самый холодный и за самый тёплый месяцы в Арктике (февраль и июль), рассмотрев временной промежуток с 1979 по 2014 г. [5, 6]. Исходные данные представлены на рис. 4.

Для каждого временного ряда были построены и проанализированы на точность и адекватность 8 адаптивных моделей. На рис. 5 представлены построенные модели по данным за самый холодный месяц года (февраль). Лучшими по адекватности и точности стали модели, построенные на основе метода гармонических весов.

Выбранные модели могут быть использованы для построения прогноза на 2 последующих периода. Рис. 6 демонстрирует результат прогнозирования.

Долгосрочное прогнозирование на основе нейронных сетей

Для долгосрочного прогнозирования может быть использована нейронная сеть.

По приведенным выше данным на основе trial-версии интегрированной системы статистического анализа, визуализации данных и разработки пользовательских приложений Statistica 12 рассмотрим результаты построения прогноза на 15 лет (до 2028 г.) [5, 6].

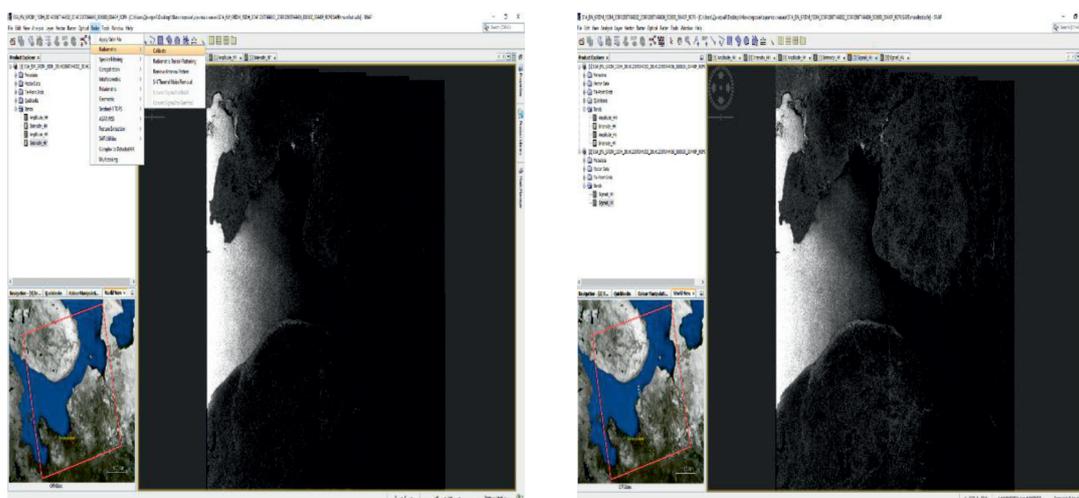


Рис. 3. Исходный снимок (слева) и радиолокационный снимок после калибровки (справа)

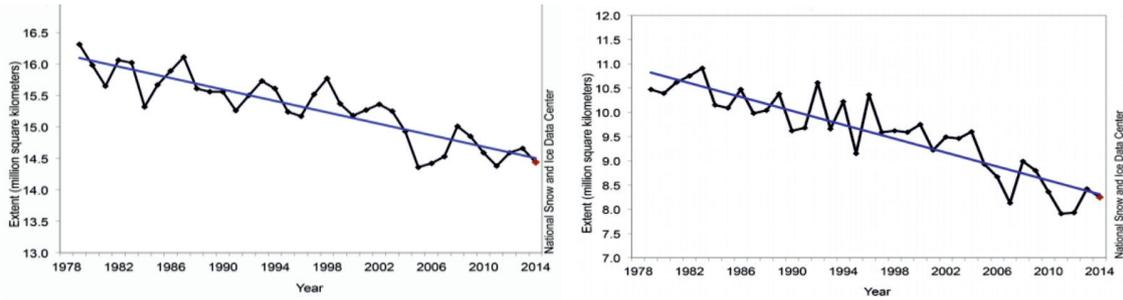


Рис. 4. Уровень ледового покрова в феврале (слева) и в июле (справа)

Функции	Адекватность				Точность						
	R/S критерий	t-критерий Стьюдента	критерий Дарбина-Уотсона	критерий пиков	S_y	\bar{E}	R^2				
Модель Брауна	3,57	+	0,15	+	1,268275	-	20	+	0,420421	2,2%	0,38
Модель Хольта-Уинтерса	3,52	+	0,09	+	1,726739	+	12	+	0,39532	2,2%	0,45
Модель Бокса-Дженкинса	4,33	+	2,50	-	1,775218	+	17	+	0,321308	1,7%	0,64
Модель Брауна с адаптивными параметрами адаптации	4,22	+	0,62	+	1,983069	+	17	+	0,307652	1,7%	0,67
Мультипликативная модель Хольта-Уинтерса	3,88	+	0,03	+	0,416582	-	24	+	0,259479	1,2%	0,76
Аддитивная модель Тейла-Вейджа	4,58	+	0,002	+	1,837551	+	16	+	0,451721	2,3%	0,28
Метод эволюции	4,67	+	0,08	+	1,274775	-	20	+	0,180545	0,9%	0,89
Метод гармонических весов	3,61	+	0,119598002	+	1,873285	+	16	+	0,151564	0,8%	0,92

Рис. 5. Адаптивные модели для временного ряда 1 (февраль)

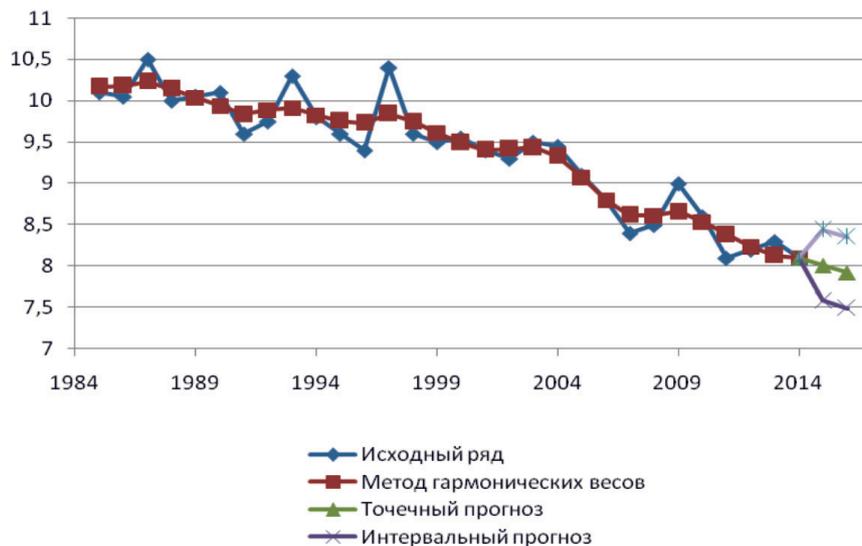


Рис. 6. Точечный и интервальный прогноз (июль)

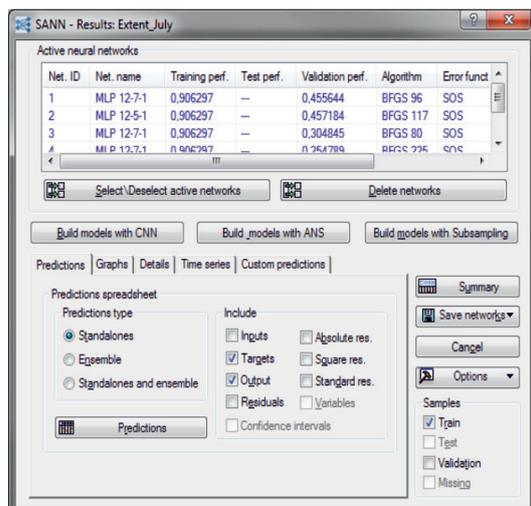


Рис. 7. Нейросетевые модели (февраль)

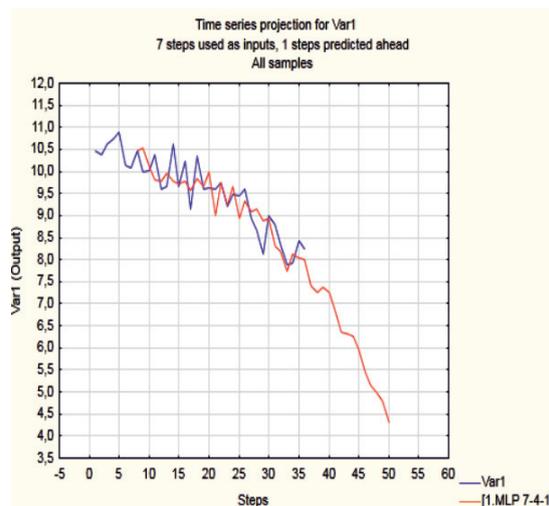


Рис. 8. Построение прогноза (июль)

После построения моделей можно провести анализ и выбрать наилучшую модель, по которой строится прогноз. Модели записываются в виде MLP 12-7-1 (многослойный перцептрон, 12 входов, 7 скрытых нейронов, 1 выход). Также можно получить описание моделей, величины производительности, контрольной производительности и величины ошибок. На рис. 7 показан результат построения нейросетевых моделей.

Процесс построения долгосрочного прогноза показан на рис. 8. Анализ представленных графиков позволяет определить имеющуюся тенденцию уменьшения уровня ледового покрытия.

Заключение

Результатом исследования стала разработка алгоритма мониторинга и моделирования изменений ледяного покрова Арктики. В процессе исследования выполнены следующие задачи:

- обзор существующих решений и инструментальных средств, используемых при мониторинге ледяного покрова;

- анализ предметной области и разработка алгоритма моделирования уровня ледяного покрова;

- выполнение краткосрочного и долгосрочного прогнозирования на основе полученных данных.

Список литературы

1. Гук А.П., Дышлюк С.С., Павлов Е.В. Формирование картографических изображений в среде ГИС// Сибирская государственная геодезическая академия. 2012. № 2–1. С. 62–66.
2. Геоинформационные системы и космический мониторинг. [Электронный ресурс]. URL: <http://sovzond.ru/products> (дата обращения: 28.09.2020).
3. Системный анализ данных дистанционного зондирования в программной среде KCA ENVI. [Электронный ресурс]. URL: https://knowledge.allbest.ru/programming/3c0a65635a3bd69b5c53a89521216d37_0.html (дата обращения: 25.09.2020).
4. Кантемиров Ю.И. Обзор основных методик обработки радарных данных ДЗЗ и их реализация в программном комплексе Sarscape // Геоматика. 2012. № 1. С. 30–43.
5. Зеленина Л.И., Антипин А.Л. Льды Арктики: мониторинг и меры адаптации // Арктика и Север. 2015. № 18. С. 122–130.
6. Зеленина Л.И. Моделирование состояния льдов Арктики // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 7–1 (18–1). С. 396–399.