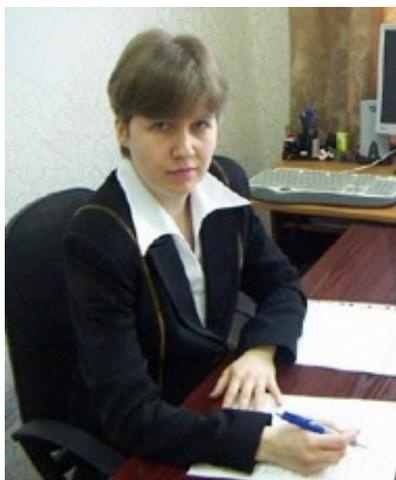


## Экология. Environmental Science

УДК 519.233.5

### Льды Арктики: мониторинг и меры адаптации



© **Зеленина** Лариса Ивановна, к.т.н, доцент кафедры прикладной математики и высокопроизводительных вычислений Института математики, информационных и космических технологий САФУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: l.zelenina@narfu.ru



© **Антипин** Алексей Леонидович, магистрант Института математики, информационных и космических технологий САФУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: carterin@yandex.ru

нологов САФУ им. М.В. Ломоносова. E-mail: carterin@yandex.ru

**Аннотация.** Мониторинг ледовых условий арктических морей позволяет провести оценку последствий их изменения, анализируя два противоположных мнения — льды Арктики тают и льды входят в «холодный цикл». Гистограмма площади многолетних арктических льдов (2002—2013 гг.), статистическая обработка данных позволила нам построить полиномиальный тренд, определяющий с достаточной степенью вероятности прогнозные значения минимальной площади арктических льдов. Была отобрана лучшая модель — метод гармонических весов и составлены точечный и интервальный прогнозы ледовитости Арктических морей на 2015 и 2016 гг. Учет рисков при изменениях климата крайне важен в отраслях добычи полезных ископаемых, морского судоходства, инфраструктуры в Российской Арктике, чтобы минимизировать возникающие потери от возможных угроз.

**Ключевые слова:** Арктика, морские льды, трендовая модель, прогноз ледовитости, учет рисков, угрозы, минимизация потерь

### The Arctic ice: monitoring and adaptation measures

© Larisa I. **Zelenina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Mathematics and Highly Productive Calculations of the Institute of Mathematics, Information and Space Technologies of NArFU named after M.V. Lomonosov. E-mail: l.zelenina@narfu.ru

© Alexey L. **Antipin**, postgraduate student, Institute of Mathematics, Information and Space Technologies of NArFU named after M.V. Lomonosov. E-mail: carterin@yandex.ru

**Abstract.** Monitoring ice conditions in the Arctic seas allows an assessment of the impact of their changes by analyzing the two opposing views — Arctic ice is melting and ice are included in the "cold cycle". Histogram area of perennial Arctic sea ice (2002—2013 gg.), Statistical processing of data allowed to construct a polynomial trend that defines a sufficient degree of probability forecast values minimum area of Arctic sea ice. The best model was selected — the method of harmonic balance and composed of point and interval forecasts of ice cover of the Arctic seas for 2015 and 2016. Risk consideration under climate change is very important in industries mining, of Maritime Navigation and infrastructure in the Russian Arctic, in order to minimize losses arising from possible threats.

**Keywords:** Arctic, sea ice, trend model, forecast of the ice cover, into account risks, threats, minimization of losses

### *Льды Арктического бассейна*

В Российской Арктике сосредоточены значительные запасы полезных ископаемых, развивается транспортная инфраструктура. При этом воздействие дрейфующего льда арктических морей на нефтяные платформы и другие сооружения, транспортные средства создаёт серьёзные риски. Именно поэтому важно понимать, что будет происходить с площадью льдов в ближайшие годы. По данному вопросу существуют два противоположных мнения — льды Арктики тают и льды входят в «холодный цикл» [1, с. 422].

*Первое мнение: арктическое таяние льдов.* В Арктическом регионе отмечаются значительные колебания климата, поэтому и происходят частые изменения ледовитости морей. Долговременные изменения средней температуры воздуха, ледовитости морей и других показателей характеризуются наличием циклических колебаний разной длительности: 60, 20, 10 и менее лет. Это происходило из-за линейного тренда потепления [2]. По данным наблюдений, температура воздуха в Арктике за последнее столетие увеличивалась почти вдвое быстрее, чем средняя температура Земли. Значительное сокращение площади оледенения за последние 30 лет (на 15—20%) подтверждают инструментальные наблюдения за арктическими льдами со спутников. Спутниковые данные показывают, что в среднем на 2,7% за десятилетие уменьшалась среднегодовая площадь льдов в Арктике. Особенно заметна динамика летнего льда. За последнее десятилетие площадь морских льдов в сентябре сократилась на 7,4% [2]. Также уменьшается средняя толщина морских льдов в арктическом бассейне, которая происходит в основном из-за сокращения площади, занимаемой многолетними льдами и, в меньшей степени, за счёт уменьшения их толщины.

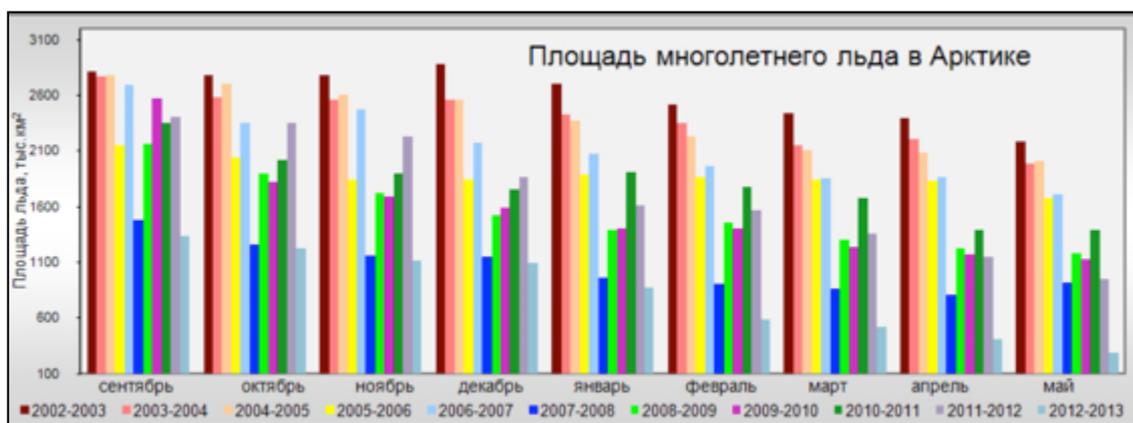


Рисунок 1. Гистограмма площади многолетних арктических льдов (2002—2013 гг.)

Таяние арктических льдов приводит к усилению потепления в регионе вследствие так называемой положительной обратной связи: увеличение темпов сокращения ледового покрова ведет к уменьшению отражательной способности поверхности (темный океан лучше поглощает тепло, чем белый лед) и, следовательно, увеличению поступления солнечной радиации.

Наиболее важным показателем ледовых условий является ледовитость. Это площадь льдов, покрывающих акваторию моря или его области независимо от сплоченности. Она определяется в процентах или квадратных километрах. Расчёт ледовитости и площади ледяных массивов определяется ежедекадно (каждые 10 дней), начиная с 1940 года. Данные по ледовитости расположены на сайте американской организации NSIDC (National Snow & Ice Data Center)<sup>1</sup>. Цель этой организации — расширение знаний об областях нашей планеты, покрытых льдами. У них есть обширный национальный банк данных по снегу и льдам. Кроме того, каждый месяц NSIDC проводят анализ льдов Арктических морей, в том числе исследуют нужный для данной работы параметр — ледовитость.

Для прогнозирования ледовитости Арктических морей можно использовать адаптивные методы — одно из современных направлений статистического анализа и прогнозирования временных рядов. Инструмент прогноза при адаптивном методе — модель. Начальная оценка параметров этой модели основывается на данных исходного временного ряда. И уже на основе новых данных, которые получаются на каждом следующем шаге, проходит корректировка параметров модели во времени, а также их адаптация к новым, непрерывно меняющимся условиям развития явления. Другими словами, модель постоянно «впитывает» в себя новую информацию, а после этого приспосабливается к ней. Адаптивные методы предназначены для краткосрочного прогнозирования. Всё вышеизложенное не означает, что адаптивные методы и модели без проблем могут заменить любые другие виды моделей.

<sup>1</sup> NSIDC (National Snow & Ice Data Center). URL: <http://nsidc.org/> (дата обращения: 07.10.2014)

Данные методы пригодны для обработки рядов с умеренными изменениями в течение времени и оказываются достаточно грубыми при прогнозировании на большое число шагов вперёд. Однако следует отметить, что в последнее время они получили развитие. Основными видами адаптивных моделей являются модель Брауна, модель Хольта-Уинтерса, модель Брауна с адаптивными параметрами адаптации, мультипликативная модель Хольта-Уинтерса, аддитивная модель Тейла-Вейджа, метод эволюции [3, с. 86; 4, с. 3—11].

Для построения выше указанных моделей использовались статистические данные ледовитости (единицы измерения — миллионы квадратных километров), опубликованные National Snow & Ice Data Center (NSIDC). При этом рассматривался самый тёплый месяц в Арктике — июль (Average Monthly Arctic Sea Ice Extent July) в период с 1979 по 2014 год, ледовитость в миллионах квадратных километрах. Статистическая обработка данных, а именно пакет регрессионного анализа, позволила построить полиномиальный тренд, определяющий с достаточной степенью вероятности прогнозные значения минимальной площади арктических льдов. Так, например, к 2016 году, если динамика сохранится, площадь многолетних арктических льдов сократится до минимума.

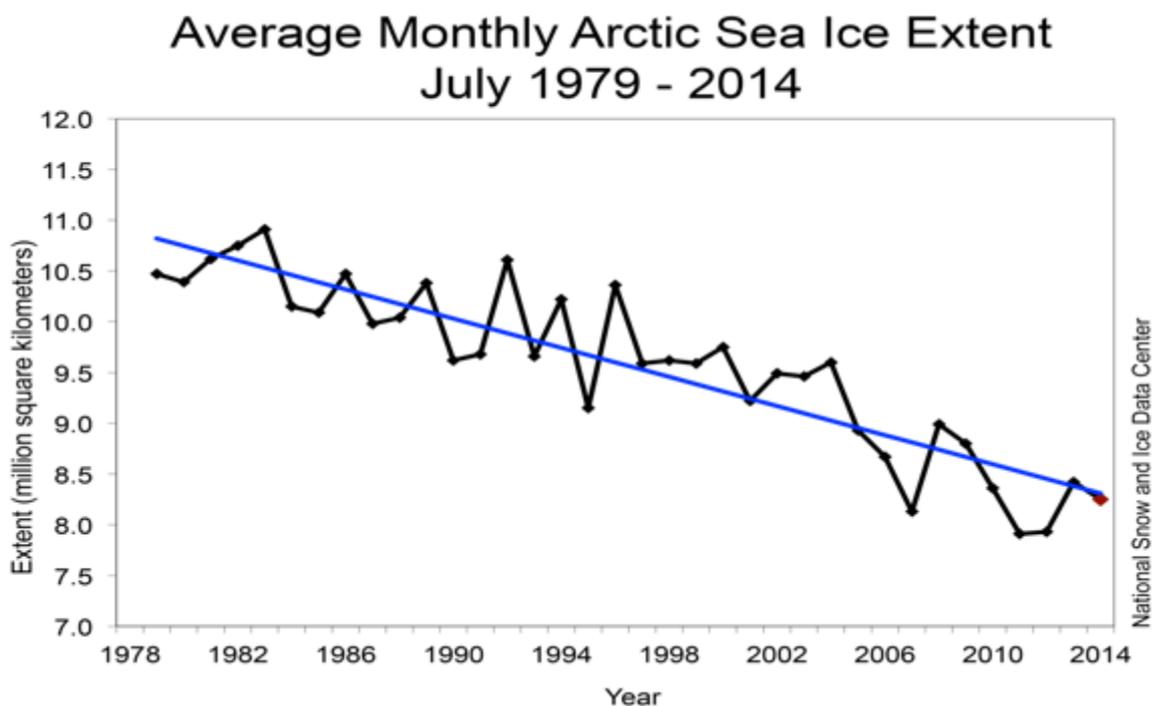


Рисунок 2. Динамика ледовитости арктических морей (июль 1979—2014)

Анализ рисунка подтверждает наличие тенденции к уменьшению величины площади льдов (каждые десять лет уменьшение составляет примерно 7,4% от общей площади). Для вычисления прогнозного значения рассматриваемого показателя на последующие периоды

адаптивными методами были построены различные модели временного ряда и на основе проведённой проверки на адекватность и точность отображена лучшая модель (таблица 1).

Таблица 1

### Адекватность моделей

| Функции   | Адекватность  |          |                  |          |                          |                | Точность      |               |             |
|---|---------------|----------|------------------|----------|--------------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|
|   | R/S критерий  | критерий | t-критерий дента | Стью-    | Критерий Дарбина-Уотсона | Критерий пиков | $S_y$         | $\bar{E}, \%$ | $R^2$       |
| Модель Брауна                                     | 4,93461       | -        | 0,05328278       | +        | 2,65776                  | + 17           | 0,4897        | 3,78          | 0,54        |
| Модель Хольта-Уинтерса                            | 4,27876       | +        | 0,00454967       | +        | 2,22423                  | + 16           | 0,4844        | 3,87          | 0,55        |
| Модель Бокса-Дженкинса                            | 4,90628       | -        | 0,57909999       | +        | 2,66480                  | + 18           | 0,3833        | 2,98          | 0,72        |
| Модель Брауна с адаптивными параметрами адаптации | 4,79030       | +        | 0,00330935       | +        | 2,04428                  | + 15           | 0,3880        | 2,91          | 0,71        |
| Мультипликативная модель Хольта-Уинтерса          | 4,00420       | +        | 0,04966785       | +        | 2,57611                  | + 19           | 0,3832        | 3,30          | 0,72        |
| Аддитивная модель Тейла-Вейджа                    | 4,55116       | +        | 8,21911E-05      | +        | 2,24242                  | + 17           | 0,5434        | 4,38          | 0,44        |
| Метод эволюции                                    | 3,89896       | +        | 0,22838161       | +        | 2,0132                   | + 18           | 0,2632        | 2,31          | 0,87        |
| <b>Метод гармонических весов</b>                  | <b>4,4143</b> | <b>+</b> | <b>0,02378</b>   | <b>+</b> | <b>2,5714</b>            | <b>+ 16</b>    | <b>0,2042</b> | <b>1,58</b>   | <b>0,92</b> |

По лучшей из построенной моделей — методу гармонических весов — был рассчитан точечный и интервальный прогнозы ледовитости Арктических морей на 2015 и 2016 года.



Рисунок 3. Прогноз ледовитости на 2015—2016 года

По данному прогнозу можно судить, что в ближайшее время площадь льдов в июле продолжит сокращаться примерно на 90 000 км<sup>2</sup>, а также о том, что «тёплый» период, кото-

рый начался в 1985 году, продолжается<sup>2</sup>. Таяние ледников способствует оживлению экономической активности в Арктике, эффективному использованию Северного морского пути. Однако важно помнить, что адаптивные модели дают только краткосрочный прогноз на 1—2 года, кроме того, существует и другое научное мнение о будущем Арктики: о похолодании.

*Второе мнение: новое похолодание.* Исследователи часто выделяют циклы, описывающие все климатические феномены Арктики: похолодание начала XX века, потепление в 20—40-е годы, похолодание в 60—80-е, потепление с 1985 года. Происходит чередование холодных и тёплых фаз в цикле. Согласно этой схеме, следует ожидать холодный цикл.

Используя физико-статистический подход, на основе выявленных циклических колебаний специалисты Государственного научного центра РФ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» Росгидромета (СПб) разработали фоновый климатический прогноз на XXI век среднегодовой температуры воздуха в арктической зоне 70—85° с. ш. и суммарной площади распространения льда в Арктике в западных морях (Гренландское, Баренцево и Карское) и восточных морях (Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское). Этот прогноз был основан на оценке средних для XX века характеристик 60-летнего цикла колебаний ледовитости, а также на оценке величины тренда во второй половине XX в. для каждого региона [5, с. 420]. В настоящее время наиболее вероятной считается амплитуда 200-летнего цикла. По уточнённому прогнозу директора ААНИИ И.Е. Фролова и его коллег, вместо повышения температуры воздуха и уменьшения ледовитости Арктики — вплоть до полного исчезновения сезонных льдов в СЛО — ожидаются понижение температуры к 2030—2040 гг. и увеличение ледовитости. В дальнейшем ожидается продолжение циклических колебаний, характерных для XX в., на фоне постепенного увеличения ледовитости до конца XXI века [5, с. 421]. Ожидаемые изменения ледовитости арктических морей безусловно отразятся на ледовых условиях плавания судов по трассе Севморпути и на других видах хозяйственной деятельности в Арктике. Потребуется модернизация крупнотоннажных судов, включая танкеры, повышение мощности судовых энергетических установок, укрепление корпусов судов, а также увеличение числа ледоколов и мощностей ледокольного флота [5, с. 426—427].

Учёные Пулковской обсерватории в своих научных статьях сообщают, что в Арктике похолодает — солнечная активность идёт на убыль и среднегодовая температура снижается. Они убеждены, что через некоторое время может наступить очередной «малый ледниковый

---

<sup>2</sup> Королева Ю. Всемирный потоп ждёт своего часа. URL: [http://www.pravda.ru/science/ planet/ environment/ 12-03-2014/1198657-klimat-0/](http://www.pravda.ru/science/planet/environment/12-03-2014/1198657-klimat-0/) (дата обращения: 07.11.2014).

период» (предыдущий случился в конце XVII века), который существенно повлияет на Северное полушарие: остановка тёплых течений, опреснение вод северных морей [6].

Научный сотрудник японского национального агентства по морским исследованиям Мототака Накамура в своих исследованиях также пришёл к выводу о том, что, по его данным, планету ждёт вовсе не глобальное потепление, а, наоборот, похолодание. Ученый проследил данные об изменении мирового климата с 1957 года и до настоящего момента, а затем изучил показания температуры поверхности воды Гренландского моря за тот же промежуток времени. Сопоставив полученную информацию, он сделал вывод, что 70-летний цикл потепления подходит к концу и скоро уступит место циклу похолодания. При этом он предлагает отслеживать изменения, которые происходят в направлениях тёплых и холодных течений Атлантического океана по колебаниям температуры Гренландского моря, что является хорошим индикатором изменений [7].

### ***Учёт рисков при изменениях климата***

Учет рисков при изменениях климата крайне важен в отраслях добычи полезных ископаемых, морского судоходства, инфраструктуры в Российской Арктике, чтобы минимизировать возникающие потери от возможных угроз [8,9].

Таблица 2

### ***Минимизация потерь с учётом рисков при изменениях климата в некоторых отраслях экономики***

| <b>Отрасль экономики</b>          | <b>Возможные угрозы</b>   | <b>Минимизация потерь</b>   |
|-----------------------------------|---|---|
| <b>Добыча полезных ископаемых</b> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Рост числа аварий оборудования морских сооружений на арктическом шельфе из-за резких перепадов температуры и усиления опасных гидрометеорологических явлений.</li> <li>2. Увеличение высоты ветровых волн, появление обломков айсбергов от деградирующих ледников на арктических островах — представляют опасность для добывающих сооружений и транспортных средств.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пересмотр строительных норм и правил для морских сооружений в шельфовой зоне с учётом наблюдаемых и прогнозируемых изменений климатических параметров.</li> <li>2. Создание специальных служб контроля ледовой опасности в акваториях СЛО. Учёт динамики высоты волн, ледовой активности при проектировании нефтяных платформ и других сооружений, обеспечения безопасной транспортировки.</li> </ol> |
| <b>Морское судоходство</b>        | <ol style="list-style-type: none"> <li>3. Нарушение транспортного сообщения, включая морское судоходство, из-за увеличения частоты и интенсивности аномальных погодных явлений.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>3. Совершенствование современных систем прогностического обеспечения морской деятельности, динамики гидрометеорологических характеристик. Создание эффективных локальных систем гидрометеорологи-</li> </ol>   |

### Инфраструктура

4. Вероятность формирования сложных ледовых условий на трассах Севморпути.
  5. Сокращение возможностей и периода для доставки грузов в труднодоступные районы по зимним автомобильным трассам, проложенным по замерзшим руслам, из-за изменения в сроках и процессах замерзания и вскрытия рек и водоемов.
  6. Появление рисков в эксплуатации транспортной системы, ЖКХ, зданий и сооружений, их разрушение из-за подвижек грунта в зонах таяния вечной мерзлоты.
  7. Высокая степень геокриологической опасности для инженерных сооружений, при прокладке магистральных трубопроводов и др.
  8. Нарушение инфраструктуры прибрежных территорий вследствие природных аномалий, усиления штормовой активности, эрозии берегов, поднятия уровня моря.
4. Эксплуатация судов усиленного ледового класса, строительство новых ледоколов.
  5. Повышение качества мониторинга и прогнозирования климатических изменений, погодных условий на реках и водоемах Севера. Совершенствование системы оперативного доведения погодно-климатической информации до потребителей.
  6. Разработка и внедрение новых технических норм, регламентов, инновационных технологий при строительстве инфраструктурных сооружений с учетом изменений климатических условий.
  7. Проведение оценки геокриологического риска в отношении имеющих на территории региона инфраструктурных объектов.
  8. В случае высокой степени угроз производить реконструкцию или перенос объектов инфраструктуры из опасной зоны.

### Заключение

Изменения климата несомненно касаются всех сфер жизнедеятельности населения, проживающего в Арктической зоне Российской Федерации, проблем сохранения окружающей среды. Большая часть проектов по добыче полезных ископаемых в Арктике была построена на прогнозах потепления. В случае климатического похолодания должна измениться работа всех добывающих отраслей в Арктическом макрорегионе, отдавая приоритет экологии перед экономикой в любых вариантах. Потребуется значительные инвестиции для эффективной эксплуатации Севморпути, как национальной транспортной магистрали России, обновления транспортных средств, строительства современных мощных ледоколов.

Необходимо постоянное внимание к строительству и функционированию объектов арктической инфраструктуры, в том числе в социальной сфере, включая жильё, жилищно-коммунальное хозяйство, создавая комфортные условия жизни для человека в Арктике с учетом того, что преобладающая часть населения проживает в северных городах. Специальных мер поддержки требуют вопросы обеспечения жизнедеятельности коренных малочисленных народов Севера в условиях изменений климата.

В данной статье обозначен далеко не весь спектр угроз, возникающих рисков в результате изменения климата. Необходимо продолжать проведение мониторинга, системных исследований, позволяющих предупредить и минимизировать возможные потери разных отраслей экономики, социальной сферы, сохранения окружающей среды не только при интенсивном таянии морских льдов, но и в условиях похолодания.

### Литература

1. Семенов С.М. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем, Росгидромет, 2012. С. 400—429.
2. Дымников В.П. Проблемы моделирования климата и его изменений / В.П. Дымников, В.Н. Лыкосов. М.: Институт вычислительной математики РАН, 2006. 27 с.
3. Шанченко Н.И. Лекции по эконометрике. Ульяновск, 2008, 140 с.
4. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. Москва: Финансы и статистика, 2003. 415 с.
5. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Клячкин С.В., Фролов С.В. Глава 10. Морской лед. С. 400—427. URL: [http://downloads.igce.ru/publications/metodi\\_ocenki/10.pdf](http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/10.pdf) (дата обращения: 21.01.2015).
6. Чувакин О. Арктика: оттает или замёрзнет? URL: <http://topwar.ru/27187-arktika-ottaet-ili-zamerznet.html> (дата обращения: 12.01.2015);
7. Мототака Никамура. Землю ждет глобальное похолодание в 2015 году // РБК daily, ежедневная деловая газета. 2013. 01 июля. URL: <http://rbcdaily.ru/autonews/5629499-87649152> (дата обращения: 21.01.2015).
8. Федькушова С.И., Зеленина Л.И. Анализ состояния льдов Арктики // Современные проблемы математики: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к 105-летию педагогического образования на Дальнем Востоке/ Министерство образования и науки РФ. Дальний Восток: Дальневосточный федеральный университет, 2014. С. 11.
9. Джульен Строув, Ник Тоберг. Таяние арктических льдов: ученые рассказывают о возможных последствиях. URL: <http://www.greenpeace.org/russia/ru/news/2012/September/Scientists-about-arctic-ice-minimum/> (дата обращения: 07.11.2014).

*Рецензент:* Синицкая Наталья Яковлевна,  
доктор экономических наук, профессор