

УДК 528.8

И.Б. Туркин, О.С. Бутенко

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОЩАДИ ТАЯНИЯ ЛЕДНИКОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Рассмотрены существующие методы мониторинга изменения геометрических характеристик ледников. Проведен тематический анализ космических снимков ледникового покрова Гренландии. На основе анализа статистических данных относительно изменения температуры и уровня мирового океана за период с 1999 по 2012 гг., была сформирована методика изменения геометрических характеристик ледников с учетом известных значений разнородных факторов влияния по архивным данным. Был произведен расчет прогнозных коэффициентов, построена картографическая модель изменения площади ледников до 2020г.*

**Ключевые слова:** таяние, ледники, температура, геометрические характеристики, данные космического мониторинга, факторы влияния, космические снимки, статистические данные.

### Актуальность проблемы

Как известно, ледники – природные образования, представляющие собой скопление льда атмосферного происхождения. На поверхности Земли ледники занимают более 16 млн. кв. км, то есть около 11% всей площади суши, а их общий объем достигает 30 млн. куб. км. Поэтому, при современных климатических изменениях, в частности, с постепенно продолжающимся повышением температуры воздуха у поверхности Земли, наблюдается усиленное таяние ледников [1]. Существенное увеличение темпов сокращения ледниковых покровов отмечается практически во всех районах земного шара, что в свою очередь, дает возможность не только изучить зависимость таяния ледников от повышения температуры, но и проанализировать полученные данные для оценки динамики и определения тенденций дальнейшего изменения геометрических характеристик ледников. Особенно это касается площади и толщины ледяного покрова.

В условиях глобального потепления, которое влечет за собой ряд неблагоприятных изменений в состоянии окружающей среды, начиная с повышения земной температуры, что в свою очередь приводит к таянию ледников, дисбалансу в экосистемах и к повышению уровня мирового океана. Как следствие, возрастает необходимость исследований, связанных с определением коэффициентов усиления воздействия различных факторов, вызывающих максимальные изменения и выявлением определенных закономерностей коэффициентов степени максимального влияния (согласно алгоритму Флойда-Уоршелла) с увеличением негативного воздействия на окружающую среду [2]. В связи с этим, согласно выводам Межправительственной комиссии по изменениям климата, несмотря на достигнутые к на-

стоящему времени результаты, выявление особенностей и определение динамики оледенения остается одной из самых актуальных задач [3].

Таким образом, целесообразным является разработка методики формирования геоинформационных моделей оценки текущего состояния и изменения геометрических характеристик ледников на основе данных космического мониторинга.

### 1. Анализ методов мониторинга ледников по данным ДЗЗ

Как правило, основным способом получения данных о ледовой обстановке являются визуальные наблюдения с наземных метеорологических станций, судов и самолетов. Однако, существующие методы обработки данных, полученных таким способом, достаточно трудоемки и малоэффективны. Обработке данными методами свойственны недостаточная точность определения характеристик и привязки к месту съемки, субъективность количественных оценок, малая обзорность, высокая стоимость и ограниченность во времени и пространстве. Все вышеперечисленные факторы сделали процесс наблюдения за ледниками крайне сложным [4, 5].

Зачастую, для решения такого класса задач используются такие методы наблюдения как:

1) спутниковая альтиметрия (спутниковые лазерные альтиметры с высоким разрешением для определения динамики изменений толщины быстро движущихся прибрежных ледников);

2) оценка состояния ледников по данным спутниковой гравиметрии GRACE (спутниковые измерения направлены на изучение временных вариаций гравитационного поля Земли, связанных, в частности, с процессами изменения климата);

3) глобальное позиционирование (GPS) (состоящее из 18 рабочих искусственных спутников,

размещенных симметрично на трех круговых орбитах, системы управления и пользователей). Каждый спутник из подсистемы А системы глобального позиционирования снабжен микропроцессором для обработки данных, приемником и передатчиком для связи с наземной системой управления и для передачи сигналов пользователям. Система управления объединяет операторов и наблюдателей, рассредоточенных по всей планете. Такой подход позволяет в полевых условиях проводить съемку поверхности ледника и строить карты высоты поверхности, а сам прибор достаточно прост в эксплуатации [6];

4) интерферометрические исследования ледников (метод радарной интерферометрии основан на съемке с близких параллельных орбит. Разность фаз полученных сигналов зависит от разности расстояний до цели. Интерферограмма определяет зависит разности фаз от вариаций высоты рельефа и типа подстилающей поверхности. Данные радарной интерферометрии используются, как правило, для обнаружения и измерения подвижек ледников, при численном моделировании пространственно-временных вариаций баланса массы ледника).

В настоящее же время исследование ледников трудно представить без использования спутниковых методов и технологий [1]. Система непрерывного и комплексного отслеживания состояния ледников, контроля и учета количественных и качественных характеристик во времени, а также система прогноза сохранения и развития состояния ледниковых объектов — неотъемлемая составляющая оценки текущего состояния [3].

## 2. Мониторинг ледников Гренландии

**2.1 Анализ площадных характеристик ледников Гренландии на основе данных космического мониторинга.** Слои замороженной морской воды, известной просто как морской лед, представляют собой «шапку» Северного Ледовитого океана. Увеличение ледяного покрова стремительно возрастает каждую зиму и обычно достигает своего максимума к марту. Совершенно очевидно, что стремительное таяние ледников происходит летом, достигая своего минимума в сентябре. Для определения количественных характеристик, определяющих концентрацию арктического морского льда были использованы космические снимки, временной ряд которых определялся в период с 1999 по 2012 годы для «пиковых» месяцев сентября и марта соответственно [7].

Анализ данных, полученных в результате тематической обработки космических снимков, показал, что летом 2007 года площадь арктического морского льда установила рекордно низкий уровень в начале августа — более чем за месяц до конца сезона таяния. В последующие годы, лед летом на море показывал

относительно нормальную степень таяния. В 2012 году был установлен новый рекордный минимум — более чем на 700 000 квадратных километров ниже минимума в 2007 году. При этом, определено, что движущим фактором в 2012 году было большое количество тонкого льда, который более восприимчив к плавлению от потепления температуры и к распаду ветрами и волнами [8].

Таблица 1

Данные о площади ледников за 1999 – 2012 гг.

Года <sup>¶</sup> (Сентябрь-/март) <sup>□</sup>	Сентябрь-средней- протяженности <sup>¶</sup> (млн.кв.км) <sup>□</sup>	Март-средней- протяженности <sup>¶</sup> (млн.кв.км) <sup>□</sup>
1999/2000 <sup>□</sup>	6,2 <sup>□</sup>	15,3 <sup>□</sup>
2000/2001 <sup>□</sup>	6,3 <sup>□</sup>	15,6 <sup>□</sup>
2001/2002 <sup>□</sup>	6,8 <sup>□</sup>	15,4 <sup>□</sup>
2002/2003 <sup>□</sup>	6,0 <sup>□</sup>	15,5 <sup>□</sup>
2003/2004 <sup>□</sup>	6,2 <sup>□</sup>	15,1 <sup>□</sup>
2004/2005 <sup>□</sup>	6,1 <sup>□</sup>	14,7 <sup>□</sup>
2005/2006 <sup>□</sup>	5,6 <sup>□</sup>	14,4 <sup>□</sup>
2006/2007 <sup>□</sup>	5,9 <sup>□</sup>	14,7 <sup>□</sup>
2007/2008 <sup>□</sup>	4,3 <sup>□</sup>	15,2 <sup>□</sup>
2008/2009 <sup>□</sup>	4,7 <sup>□</sup>	15,2 <sup>□</sup>
2009/2010 <sup>□</sup>	5,4 <sup>□</sup>	15,1 <sup>□</sup>
2010/2011 <sup>□</sup>	4,9 <sup>□</sup>	14,6 <sup>□</sup>
2011/2012 <sup>□</sup>	4,6 <sup>□</sup>	15,2 <sup>□</sup>

**3.2 Анализ изменения температуры за период с 1999 по 2012 гг.** Глобальное потепление является собой необычно быстрое увеличение средней температуры на поверхности Земли. За последние сто лет, в основном, это происходило за счет парниковых газов, образуемых в результате сжигания топлива людьми. Мировая средняя температура выросла на 0,6 - 0,9 градуса по Цельсию (1,1 до 1,6 F) между 1906 и 2005. Еще больше скорость роста температуры удвоилась за последние 50 лет и продолжает стремительно повышаться (рис. 1) [3].

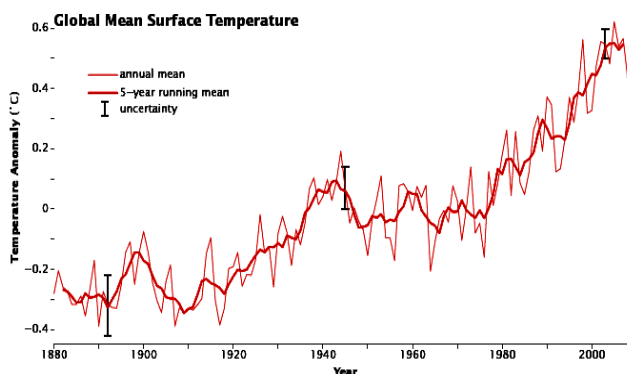


Рис. 1. График изменения приземной температуры Земли

Имея среднестатистические данные, можно заключить, что за период 1999-2012 годов, происходили некоторые скачки в температурном режиме, а средняя температура по сентябрю за 2012 относи-

тельно 1999 увеличилась больше чем на 2°, что свидетельствует о глобальном потеплении (рис. 1).

**2.3 Анализ изменений уровня мирового океана.** Если провести анализ причин и последствий глобального потепления, то изменение погоды - не единственное на что влияет глобальное потепление. Таяние ледников приводит к повышению уровня моря, следствием чего станут более частые затопления прибрежных регионов. Некоторые островные государства исчезнут. Это является очень серьезной проблемой, потому что до 10 процентов населения мира живет в уязвимых районах, менее 10 метров над уровнем моря [9].

Анализ статистических данных показал, что между 1970 и 2000 годами, уровень моря возрос где-то на 1,7 миллиметра в год, в среднем. Если рассматривать общее повышение уровня моря, то оно достигает 221 миллиметров. Начиная с 1993 года, спутники НАСА показали, что уровень моря поднимается быстрее, примерно в 3 миллиметра в год, а в общей сложности - повышение уровня моря на 48 миллиметров (0,16 футов или 1,89 дюйма) в период между 1993 и 2009 годами (рис. 2).

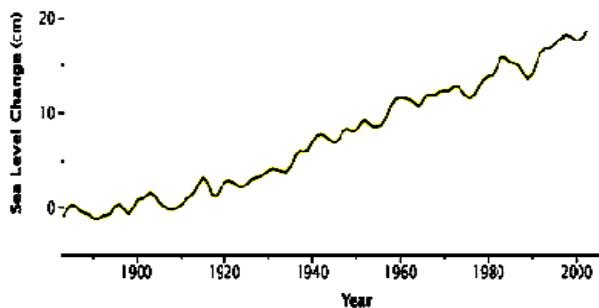


Рис. 2. График изменения уровня мирового океана

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) считает, что уровень Мирового океана поднимется от 0,18 до 0,59 в год.

### 3. Математическое моделирование изменений геометрических характеристик ледников

При оценке текущего состояния и исследовании динамики геометрических изменений состояния ледников, в упрощенном варианте предлагается за основу для построения математической модели взять классическое уравнение плоскости  $Z=AX+BY+C$ . Поскольку уравнение содержит три неизвестных составляющих, то для их определения была составлена система из трех уравнений:

$$\begin{cases} Z_1 = AX_1 + BX_1 + C, \\ Z_2 = AX_2 + BX_2 + C, \\ Z_3 = AX_3 + BX_3 + C, \end{cases}$$

где  $X_1$  – max значение температуры;  
 $X_2$  – min значение температуры ;

$X_3$  – среднее значение температуры;  
 $Y_1$  – max значение уровня мирового океана;  
 $Y_2$  – min значение уровня мирового океана;  
 $Y_3$  – среднее значение уровня мирового океана;  
 $Z_1$  – max значение площади ледового покрова по данным ДЗЗ, взятое из табл. 1;  
 $Z_2$  – min значение площади ледового покрова по данным ДЗЗ ;  
 $Z_3$  – среднее значение площади ледового покрова по данным ДЗЗ;

$A, B, C$  – искомые коэффициенты, позволяющие определить показатель, определяющий силу максимального воздействия факторов, влияющих на прогнозный показатель динамики объекта [10].

Неизвестные коэффициенты  $A, B, C$  являются основными компонентами для дальнейшего изучения изменений геометрических характеристик ледников. Для их определения был использован программный продукт MathCAD, в который были занесены две системы уравнений с известными значениями.

Коэффициенты  $A, B, C$  были подсчитаны автоматически и представлены в табл. 2.

Таблица 2  
 Значения прогнозных коэффициентов

Коэффициент	Значение за сентябрь	Значение за март
<b>A</b>	-0,099	-0,583
<b>B</b>	0,374	0,465
<b>C</b>	3,128	25,654

Определенные коэффициенты  $A, B, C$  (табл. 2) по сентябрю и марту, дают возможность для анализа и определения дальнейшей тенденции изменений геометрических характеристик ледников.

В соответствии с полученными коэффициентами была создана карта прогнозирования изменений площади ледников Гренландии до марта 2020 года.

Анализ научной литературы по данной тематике показал, что в результате статистических исследований, связанных с изучением изменения климата на Земле, рядом ученых был сделан вывод о том, что уровень мирового океана поднимается приблизительно на 0.7 мм ежегодно, а среднегодовая температура к 2020 году повысится где-то на 1 градус С.

Для проверки адекватности построенного прогноза был проведен сравнительный анализ реальных данных с рассчитанными. Расхождение в прогнозе и реальных данных составило порядка 2%. Учитывая известные показатели и реальные данные за 2012 год рассчитанная площадь ледникового покрова на прогнозируемый год ( $Z^*= 13,84$ ) и реальный, а также построенный прогноз до 2020 года отображен в виде карты и представлен на рис. 3.

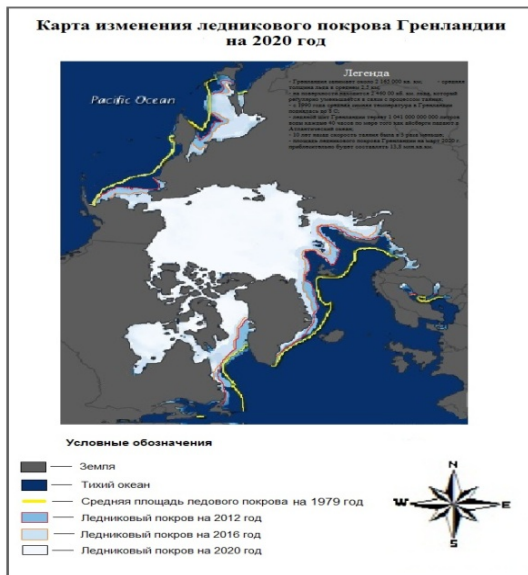


Рис. 3. Картографічна модель стану ледникового покрива на март 2020 року

## Выводы

В современном мире наиболее целесообразным является не проведение натуральных экспериментов в реальных условиях, а их моделирование с использованием мощных технических средств и последних достижений науки. Особенно это касается математического моделирования, которое используется для приближенного описания какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженного с помощью математической символики.

Предложенная методика построения геомодели позволяет не только определить дальнейшую тенденцию изменений объекта мониторинга, но и смоделировать прогнозируемые изменения геометрических характеристик ледников за счет определения основных компонент, характеризующих степень влияния разнородных факторов, в единой системе уравнений. Такой подход может служить основой

для оперативного принятия решений по предупреждению негативных последствий, обусловленных изменением климата и в будущем.

## Список литературы

1. Mapexpert - [http://mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=24&table=news](http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=24&table=news). – 24.05.2013
2. Gorelik S.I. Method of creating a comprehensive geo-model of potentially under floodable zones with limited a priori information [Text] / S.I. Gorelik, O.S. Butenko, G.Y. Krasovsky // *News of Science and Education*. – 2014. – № 21 (21). – С. 28-36.
3. Электронный учебно-методический комплекс. - [http://www.kgau.ru/distance/zuf\\_05/nezamov-monitoring/00d\\_biblio.html](http://www.kgau.ru/distance/zuf_05/nezamov-monitoring/00d_biblio.html). - 24.05.2012
4. Российская академия наук институт географии – <http://igras.ru/index.php>, /r-172i-38 – 24.05.2013 Лундсей, РВ, Дж. Чжан: Истончение арктического морского льда 2005 год.
5. Бутенко О.С. Синтез методов комплексного анализа данных мониторинга экосистем в условиях информационной неопределенности [Текст] / О.С. Бутенко // *Системы обработки информации: сб. науч. пр. / ХУПС*. – X., 2012. – Вып. 9 (107). – 237–241 с.
6. Паркинсон С.Л., Cavalieri D.J., Gloersen H.J.: Арктический морской лед степени, областей и направлений, - 1978-1996 год, 104 (С9):20837-20856.
7. Курбатова И.Е. Использование данных космического мониторинга для оценки экологического состояния крупных объектов.
8. Российская академия наук институт географии – <http://igras.ru/index.php>, /r-172i-38 – 24.05.2013 Лундсей, РВ, Дж. Чжан: Истончение арктического морского льда 2005 год.
9. Алексеева Т.А., Фролов С.В. Сравнительный анализ спутниковых и судовых данных о ледяном покрове в морях Российской Арктики//*Исследование Земли из космоса*. 2012 №6. С. 69-76.
10. Бутенко О.С. Метод определения индикаторов прогнозируемого состояния экологических объектов [Текст] / О.С. Бутенко // *Системы обработки информации: сб. науч. пр. / ХУПС*. – X., 2012. – Вып. 7 (105). – 270–272 с.

Надійшла до редколегії 22.05.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Можаяев, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

## ФОРМУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЬДОВИКІВ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

І.Б. Туркін, О.С. Бутенко

У даній статті розглянуті існуючі методи моніторингу зміни геометричних характеристик льодовиків. Проведений аналіз космічних знімків льодовикового покриву Гренландії. На основі аналізу статистичних даних відносно зміни температури і рівня світового океану за період з 1999 по 2012 рр., була сформована методика зміни геометричних характеристик льодовиків з урахуванням відомих значень різнорідних чинників впливу за архівними даними. Був проведений розрахунок прогнозних коефіцієнтів і побудована картографічна модель змін площі льодовиків до 2020 р.

**Ключові слова:** танення, льодовики, температура, геометричні характеристики, дані космічного моніторингу, фактори впливу, космічні знімки, статистичні дані.

## FORMING OF GIS MODEL OF CHANGE OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS GLACIER ON REMOTE SENSING DATA

I.B. Turkin, O.S. Butenko

In this paper reviewed the existing methods of monitoring changes in the geometric characteristics of the glaciers. We analyzed satellite images of the ice sheet in Greenland. Based on the analysis of statistical data regarding changes in temperature and global sea level during the period from 1999 to 2012. Was formed technique changes the geometric characteristics of glaciers in view of the known values of diverse influences. Was calculated unknown coefficients and cartographic visualization techniques formulated.

**Keywords:** melting glaciers, temprache, geometric characteristics, diverse influences, satellite images, statistical data.