

УДК 551.2/3

## МОНИТОРИНГ МАЛЫХ ЛЕДНИКОВ КАК ИНДИКАТОРОВ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА

В.М. Глотов<sup>1</sup>, С.Б. Коваленок<sup>2</sup>, Г.П. Милиневский.<sup>2,3</sup>, Е.Ф. Накалов<sup>2</sup>, Ю.В. Фулитка<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный университет "Львовская политехника"*

<sup>2</sup> *Украинский антарктический центр*

<sup>3</sup> *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко*

**Реферат.** В статье предложена методика геоморфологического мониторинга ледниковых куполов небольших островов, расположенных в районе Антарктического полуострова. Изменение размеров, формы и контуров ледниковых куполов островов Аргентинского архипелага дает возможность использовать результаты геодезических измерений ледников для изучения региональных климатических изменений. В статье представлены исторические данные наблюдений ледникового купола о. Галиндез архипелага Аргентинские о-ва. Данные пятидесятилетних метеорологических наблюдений станции Фарадей/Вернадский, измерения уровня моря, данные измененной размеров/толщины морского льда, мониторинг озонового слоя и потока ультрафиолетового излучения, гидрологические наблюдения, исследования состояния верхней атмосферы являются дополнительными источниками для анализа климатических изменений в регионе Антарктического полуострова. Представлена также технология выполнения цифровой фототеодолитной съемки с целью исследования изменений ледников Антарктического полуострова и Аргентинских островов. Предложен расчет точности полученных координат. Подчеркивается целесообразность отображения выходов ледников в виде фронталей. Приведены результаты геодезической съемки, проведенной в районе станции Академик Вернадский в течение летнего сезона 2002 года.

**Моніторинг малих льодовиків як індикаторів змін клімату в районі Антарктичного півострова.** В.М. Глотов, С.Б. Ковальонко, Г.П. Міліневський, Е.Ф. Накалов, Ю.В. Фулітка

**Реферат.** В статті запропонована методика геоморфологічного моніторингу льодовикових маківок невеликих островів, розташованих в районі Антарктичного півострова. Змінність розмірів, форми і контурів льодовикових маківок островів Аргентинського архіпелагу дозволяє використовувати результати геодезичних вимірювань льодовиків для вивчення регіональних кліматичних змін. В статті наведені історичні дані спостережень льодовикової маківки о. Галіндез архіпелагу Аргентинські о-ви. Дані п'ятдесятирічних метеорологічних спостережень станції Фарадей/Вернадський, вимірювання рівня моря, дані про зміни розмірів/товщини морського льоду, моніторинг озонового шару і потоку ультрафіолетового випромінювання, гідрологічних спостережень, дослідження стану верхньої атмосфери є додатковим джерелом для аналізу кліматичних змін в регіоні Антарктичного півострова. Подана також технологія виконання цифрової фототеодолітної зйомки для вивчення змін льодовиків Антарктичного півострова і Аргентинських островів. Запропоновано розрахунок точності отриманих координат. Наголошується на доцільності відображення виходів льодовиків у вигляді фронталей. Наведені результати геодезичної зйомки, проведеної в районі станції Академік Вернадський протягом літнього сезону 2002 року.

**Monitoring of small ice caps as indicators of the Antarctic Peninsula region climate change** by V. M. Glotov, S.B. Kovalenok, G.P. Milinevsky, E.F. Nakalov, Yu.V. Fulitka

**Abstract.** The continuous geomorphology survey of the ice caps of the small islands in the Antarctic Peninsula region is concerned. The changes of the size, shape and edge location of ice caps of Argentina Island archipelago permit to use the geodetic survey data of the caps in studying the regional climate variability. The paper is based on historical data of the Galindez Island ice cap observation. The data of fifty years meteorological observations and tide data at Faraday/Vernadsky station, longer-term variability in sea-ice extent/thickness, monitoring of the ozone layer and UV energy flow, hydrology measurements provided at Vernadsky, the upper atmosphere change measurements over Antarctica, are the additional sources for the climate pattern of Antarctic Peninsula. The geodesy survey technology for the small island ice caps investigation in the Vernadsky station region is presented. The expected coordinates accuracy is calculated. It emphasizes the expediency of the reflection of glacier close parts in the vertical section. The Vernadsky station region geodetic survey data obtained during 2002 season are discussed.

**Key words:** ice cap, geomorphology, and climate change.

### 1. Введение

Данные исследований ледникового купола острова Галиндез архипелага Аргентинские острова свидетельствуют о значительных изменениях размеров купола, происшедшие с конца

1930-х годов. По наблюдениям за последние 50 лет на станции Фарадей/Вернадский среднегодовая температура воздуха в районе Антарктического полуострова возросла на 2.5°C (King, 1994; Morris and Vaughan, 2003). В связи с этим естественно предположить, что изменение размеров ледникового купола являются реакцией на региональные климатические изменения.

Наблюдения за ледниковым куполом острова Галиндез проводятся с момента основания научно-исследовательской станции. Существует представление, что ледниковые купола, покрывающие сейчас острова архипелага, являются реликтами шельфового ледника, в результате воздействия которого острова приобрели свои современные очертания (Thomas, 1963). В 1960 годах был опубликован отчет о балансе массы ледникового купола, включающий детальную информацию о форме и размерах ледника (Sadler, 1968; Thomas, 1963).

В настоящее время остается открытым вопрос как о дальнейшей истории ледниковых куполов Аргентинских островов, так и судьбе ледового шельфа Западной Антарктики (Vaughan and Spouge, 2002). По данным Флеминга ледниковые купола, являющиеся остатками шельфового ледника, должны исчезнуть в ближайшие десятилетия (Fleming, 1940). В соответствии с наблюдениями других ученых ледники находятся вблизи состояния динамического равновесия и мало изменяются в течение времени (Sadler, 1968). По некоторым данным последнего десятилетия было обнаружено уменьшение объема купола примерно на 10%. Подобные изменения ледниковых полей в районе Антарктического полуострова на о. Аделаида отмечены в (Smith et al, 1998). Для выяснения современного состояния и судьбы ледового купола острова Галиндез, других островов архипелага, их динамики в зависимости от изменений климата в районе Антарктического полуострова, в 2001 году в Украинском антарктическом центре была разработана и начата программа геодезических наблюдений ледниковых куполов методами фотограмметрии с использованием высокоточной GPS привязки координат.

## 2. Обзор исследований ледникового купола о. Галиндез

Аргентинские острова представляют собой небольшую группу островов расположенных в семи – двенадцати километрах к западу от побережья Земли Грейяма и отделенных от Антарктического полуострова проливом Пенола (65.15°ю.ш., 64.17°з.д.). Остров сложен горными породами с преобладанием скалистого рельефа, южное побережье покрыто основной массой льда, отвесно обрывающейся в форме крутых склонов - клифов (Thomas, 1963). Все свободные ото льда территории подверглись значительной ледниковой экзарации, температурному выветриванию. Пролиты между островами архипелага до недавнего времени были заполнены многолетним льдом.

Наибольшие острова Аргентинского архипелага покрыты небольшими ледниковыми куполами, имеющими вытянутую форму, пологий северный склон и круто обрывающийся южный склон, изобилующий клифами и гротами. Ледниковые купола симметричны оси параллельной направлению преобладающих ветров.

Станция Академик Вернадский расположена на западной оконечности острова Галиндез, одного из наибольших островов архипелага Аргентинские острова. Станция построена в 50-х годах, с конца 30-х годов в данном районе проводятся наблюдения за климатом. Метеорологические наблюдения за температурным режимом показали, что среднегодовая температура увеличилась на 2.5°C, хотя на протяжении данного отрезка времени были периоды потепления и похолодания (King, 1994). Минимальные температуры регистрировались в 1950-х годах, период похолодания в конце 70-х годов, а максимальные температуры воздуха регистрировались в 1980-х годах (King, 1994).

В начале 1960-х годов впервые проведены гляциологические исследования ледникового купола острова Галиндез (Thomas, 1963). Наблюдения 1961 года показывают сокращение площади ледника, отступ его края на западном и восточном склонах, наименьшую регрессию на южных клифах (Thomas, 1963). Расположение ледниковых трещин показало незначительные изменения, очевидно связанные со строением подледниковой поверхности.

В целом ледниковый купол уменьшает свои размеры, но изменения не однородны для всего ледника. Некоторые участки действительно деградировали больше чем другие, а на нескольких участках увеличился ледниковый покров. Например, узкий перешеек между мысом Марина и островом Галиндез целиком растаял в 1995 году, хотя был покрыт льдом двухметровой толщины в 1986 году и пересекался двумя небольшими ледниковыми трещинами. Примером изменений состояния ледового покрова на острове может быть также протаивание ледовой перемычки на мысе Марина в 1998 году, в результате чего озеро вблизи здания станции, существовавшее десятки лет, полностью вытекло в океан.

Локальные наблюдения показывают, что основным фактором, определяющим процесс аккумуляции на ледовых куполах, являются преобладающие ветра в течение длительных снегопадов, особенно в начале зимы. По наблюдениям на станции Фарадей/Вернадский среднегодовая температура увеличилась на 2.5°C с 1947 года (King, 1994; Підготовка, 2002). В летний период обложных дождей и сильных ветров, когда температура поднимается до +5°C, происходит наибольшая абляция (Fleming, 1940; King, 1994). Однако отмечено, что аккумуляция снега происходит даже на протяжении относительно теплого летнего периода, аккумуляция не изменяется с высотой места, на нее не влияет крутизна склона и расположение относительно сторон света. В работе отмечается увеличение ареала растительного покрова на о. Галиндез, как следствие деградации ледникового купола (Sadler, 1968; Thomas, 1963). Существование четкой разделительной линии между областями с растительным покровом различного типа, свидетельствует о том, что расположение постоянного льда на острове длительный отрезок времени не изменялось. Присутствие колоний споровых растений на обнажениях горных пород могут свидетельствовать, что регрессия льда произошла недавно (Sadler, 1968).

Таким образом, имеющийся в распоряжении целый ряд прямых и косвенных данных наблюдений не дают однозначного ответа на вопрос о динамике ледниковых куполов в ближайшие десятилетия.

### 3. Метод геодезической съемки ледников

Для исследования изменений размеров, формы и изменения положения края ледника была разработана методика использования наземной фототеодолитной съемки НФС (Бруевич, 1979), которая с 2002 года применяется для наблюдения за ледниками островов Аргентинского архипелага и дает возможность определить следующие параметры ледников: (1) фиксирование пространственного размещения ледников за определенный отрезок времени; (2) получение с помощью фотоматериалов данных об особенностях морфологии ледников и их морфометрических характеристик; (3) по результатам нескольких циклов можно определить пространственные изменения ледников, изменения их формы и размеров, а также изменение объемов, составляющих их масс льда; (4) использование фотоматериалов для разнообразных гляциологических работ.

Полевые работы при выполнении фототеодолитной съемки состоят из следующих стадий: рекогносцировка участка и составление рабочего проекта съемки; закрепление контрольных и базисных точек и проведение работ по определению их геодезических координат; определение центров долгосрочной съемки; фотографирование (Руководство, 1977).

Центры для долгосрочной съемки были изготовлены для установления приборов с торцевой части трубы, где жестко закреплялась подставка размером 15x15 см<sup>2</sup>, в которой сделано отверстие для принудительного центрирования диаметром 16 мм. Таких конструкций сделано четыре: две для наблюдения за ледником острова Галиндез и две за ледником острова Винтер. Центры установлены на местности с помощью бетонирования.

Комплекс наблюдений состоял в следующем. На левой и правой точках базиса устанавливался прибор и марка.

На левой точке - цифровой фототеодолит, на правой – визирная марка. Центрирование проводилось обычным для геодезических приборов способом.

После установления цифрового фототеодолита и марки измеряют высоту инструмента  $i$ . Съемка проводилась при разных фокусных расстояниях камеры. Далее согласно технологичной схеме определялись координаты точек съемки с помощью GPS в статическом режиме для повышения точности нахождения местоположения центров.

Таким образом, планы с горизонталями не могут служить надежной топографической

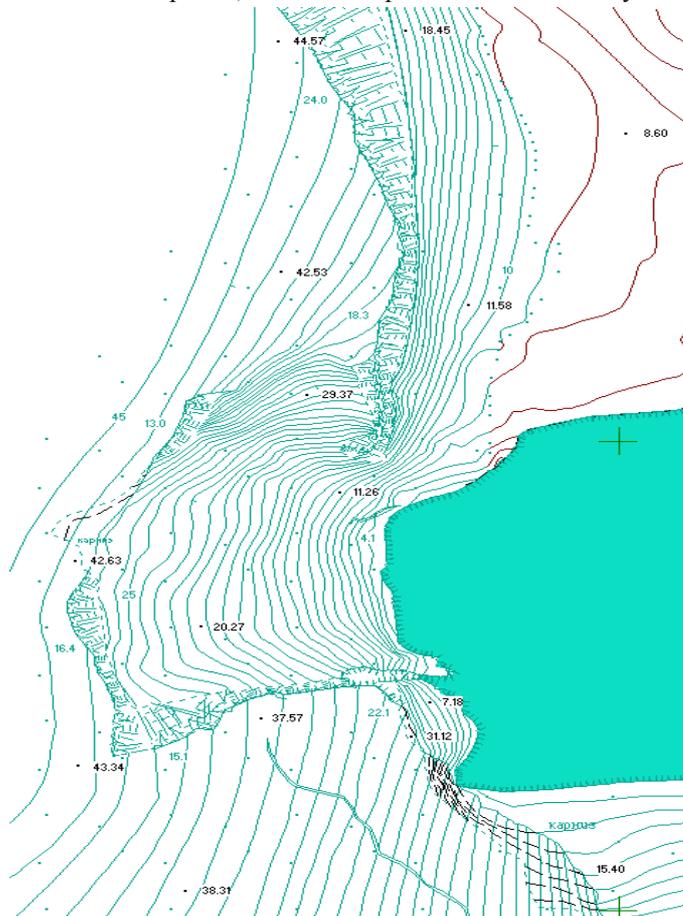


Рис.1 Фрагмент западной части ледника острова Галиндез (план в масштабе 1:1000).

основой. Таким образом, проведены нулевые циклы съемки ледника. В результате съемки в разное время получили 12 стереопар как нормального, так и равно отклоненных влево и право с фокусными расстояниями 92 мм и 280 мм.

Камеральная обработка полученных материалов проводилась на цифровой фотограмметричной станции (ЦФС). Один из примеров обработки фототеодолитной съемки приведен на рис. 1. Однако при рисовке рельефа крутых склонов ледника возникли некоторые трудности. Основной причиной низкого качества топографических планов данных участков ледников является значительная крутизна склонов, которые подвергаются съемке. Проанализировав величины положения горизонталей в зависимости от принятой высоты сечения рельефа, крутизны склонов и масштаба плана, оказалось, что, приняв в качестве оптимальной величину положения горизонталей на плане  $b = 1$  мм, обрыв крутизной  $80^\circ$  можно изобразить только на крупномасштабном плане масштаба 1:100. На

планах масштабов 1:2000—1:500 при  $b = 1$  мм и высотах сечения рельефа 2 м и 1 м можно изобразить склон крутизной не больше  $60^\circ$ .

Если топографический материал необходимо получить в виде ортогональной проекции местности с изображением рельефа цифровыми отметками и изолиниями, то характер изменений в изображении рельефа зависит от вертикальной площади проекции.

Способ изображения местности в проекции на вертикальную площадь состоит в следующем. Участок местности рассекают вертикальными плоскостями параллельными выбранной плоскости проекции и расположенными на определенных расстояниях. Расстояние между соседними плоскостями (интервал сечения рельефа), которые пересекаются, выбирается или задается. В пересечении этих плоскостей с поверхностью Земли создаются изолинии и линии равных расстояний от вертикальной (фронтальной) площади проекции - фронталы. Фронталы представляют собой плоские кривые линии, которые характеризуют изменения рельефа в необходимом разрезе. Фронталы, отдельные характерные выступы, впадины, а также

точки контуров ситуации проектируются на плоскость проекции (Бруевич, 1979). Таким образом, рельеф выхода ледников был отображен в фронталях.

#### 4. Обсуждение результатов

Впервые теодолитная съемка в рамках научной программы по гляциологии Британской антарктической службы проводилась для изучения динамики ледниковых куполов островов Аргентинского архипелага британцами в 1960-63 годах (Thomas, 1963).

Наземная фототеодолитная съемка впервые была применена для наблюдений за изменением размеров, формы и конфигурации ледниковых куполов островов Аргентинского архипелага в 2002 году.

Проанализировав полученные в результате проведенных исследований данные, можно определить пространственные изменения ледниковых куполов, изменения их формы и размеров, а также изменение объемов, составляющих их масс льда.

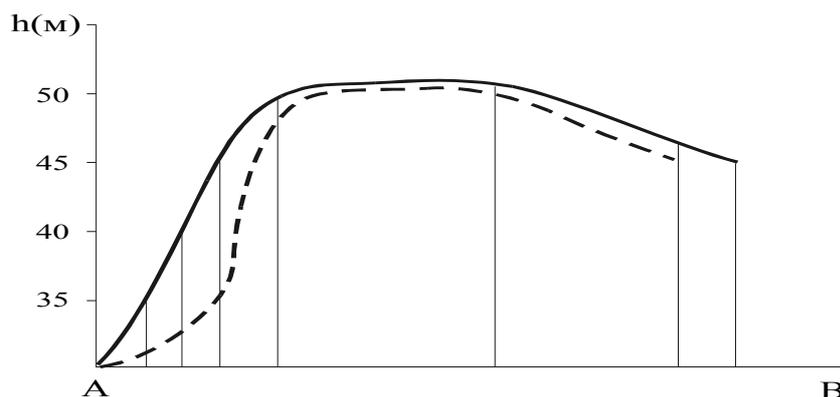


Рис.2. Продольные профили ледового купола острова Галиндез. Масштабы: горизонтальный: 1:40 000; вертикальный: 1:250; сплошная линия: профиль по АВ – 1961 г.; пунктир: профиль по АВ – 2002 г.

Сравнение продольных профилей съемок ледникового купола острова Галиндез выполненных в 1961 и 2002 годах свидетельствует о значительной абляции (рис. 2). Верхний профиль (линия А-В соответствует продольной оси ледника) построен по измерениям 1961 года (Thomas, 1963), нижний профиль – 2002 года (Підготовка, 2002). Масштабы – горизонтальный 1:40 000, вертикальный 1:250. За сорок лет произошло выполаживание южного края ледникового купола, его высота в сравнении с данными 1961 года уменьшилась на ~ 1 метр, что соответствует средней эквивалентной скорости абляции за последние десятилетия около 3 см/год.

#### 5. Выводы

Из исследований, проведенных в британских экспедициях 1940-1960 гг. следует, что малые ледниковые купола архипелага Аргентинские острова являются деградирующими реликтами древнего ледникового щита (Бруевич, 1979).

Исследования показали возможность использования цифровой НФС для создания планов и определения числовых параметров ледников. Рельеф крутых склонов ледника для получения качественных топографических планов данных участков ледников необходимо изображать в виде фронталей. Обработка цифровых изображений ледников, полученных цифровым фототеодолитом, проводится с помощью ЦФС «Дельта-2» (Готов, 2000).

По результатам современных наблюдений ледового купола о. Галиндез отмечается постоянное уменьшение его объема в течение последних десяти лет. Это позволяет предположить, что ледниковый купол может исчезнуть в течение ближайшего столетия, что

коррелирует с глобальной тенденцией потепления климата. Среднегодовая температура воздуха на острове Галиндез с 1947 года увеличилась на 2.5С°. Ледниковый купол уменьшает свои размеры, но происходящие изменения не однородны. Полученные результаты показывают необходимость проведения постоянного мониторинга ледового купола о. Галиндез и других ледников архипелага Аргентинские острова.

### Литература

**Бруевич П.Н.**, Кириленко В.С., Лысков Г.А. Наземная фототопографическая съемка при инженерных изысканиях. - М.: Недра. - 1979.

**Глотов В.М.** Розробка та дослідження фототеодоліта на базі цифрової камери Kodak DC260 та оптичного теодоліта Theo-010В // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища-GPS і GIS-технології. - 2000. - С. 5-9.

**Лобанов А.Н.** Фототопографія. - М.: Недра. - 1983.

**Підготовка** та проведення 6-ої Української антарктичної експедиції. // Звіт. Український антарктичний центр. - 2002. - №0101U002097. - 145 с.

**Руководство** по топографическим съемкам в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. Фототеодолитная съемка. - М.: - Недра, - 1977.

**Fleming W. L. S.** Relic glacial forms on the western seaboard of Graham Land // Geogr. J. - 1940. - 96. - No 2, - P. 93-100.

**King J. C.** Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula // International Journal of Climatology. - 1994. - 14. - No 4. - P. 357-369.

**Fowbert J. A.**, Lewis-Smith R. I. Rapid Population Increases in Native Vascular Plants in the Argentina Islands, Antarctic Peninsula // Arctic & Alpine Research. - 1994. - 26. - No 3. - P. 290-296.

**Morris E.M.**, Vaughan D.G. Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of viability of ice shelves // AGU Antarctic Research Series. - 2003 (in press).

**Sadler I.** Observations on the Ice Caps of Galindez and Skua Islands, Argentine Islands, 1960-1966 // Br. Antarct. Surv. Bull. - 1968. - No. 17. - P. 21-49.

**Smith A.M.**, Vaughan D.G., Doake C.S.M. et al. Surface lowering of the ice ramp at Rothera Point, Antarctic Peninsula, in response to regional climate change // Annals of Glaciology.- 1998. - No. 27. - P. 113-118.

**Thomas R. H.** Studies on the Ice Cap of Galindez Island, Argentine Islands. // Br. Antarct. Surv. Bull. - 1963. - No. 2. - P. 27-43.

**Vaughan D.G.**, Spouge J.R. Risk estimation of collapse of the West Antarctic ice sheet // Climatic Change. - 2002. - Vol. 52. - P. 65 - 91.