

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛЕДНИКОВ ОСТРОВОВ АРГЕНТИНСКОГО АРХИПЕЛАГА С ПОМОЩЬЮ GPS ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА АНТАРКТИЧЕСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

С.Б. Коваленок¹, Г.П. Милиневский^{1, 2}, В.Н. Глотов³, К.Р. Третяк³, Р.Х. Греку⁴,
Ю.Г. Ладановский⁵, М.Ю. Москалевский⁶, Ю.Я. Мачерет⁶, П.И. Бахмач⁵

¹ Украинский Антарктический центр, Киев, Украина

² Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Украина

³ Национальный университет "Львовская политехника", Львов, Украина

⁴ Институт геологических наук, Киев, Украина

⁵ ЕСОММ Со, Киев, Украина

⁶ Институт географии, Москва, Россия

E-mail: antar@carrier.kiev.ua

Введение

В 2002 году в Украинском антарктическом центре были начаты регулярные геодезические исследования ледниковых куполов малых островов в районе Антарктического полуострова. Программа выполняется в рамках проекта по созданию географической информационной системы (ГИС) архипелага Аргентинские острова.

Цель работы – прогноз динамики ледниковых куполов малых островов архипелага в связи с региональными изменениями климата на основе точных данных GPS и фотограмметрии. Частичная дезинтеграция шельфовых ледников предопределяется изменениями климата в районе Антарктического полуострова. Подобные события наблюдаются и на ледниковых куполах малых островов района Антарктического полуострова. За последние пятьдесят лет среднегодовая температура воздуха в районе Антарктического полуострова повысилась на 2.5°C. В соответствии с историческими данными за последнее столетие

зарегистрировано уникальное повышение температуры на 5°C в районе архипелага Аргентинские острова (Vaughan, et al, 2002).

Основная задача исследований - получение точных геодезических данных для гляциогеоморфологического мониторинга динамики ледниковых куполов и создания модели их развития, создания крупномасштабных цифровых карт (1:25,000 - 1:1,000) для архипелага Аргентинские острова.

Методика исследований - геоморфологический мониторинг ледниковых куполов, основанный на анализе исторических данных наблюдений, фотограмметрической съемке и GPS наблюдениях, дешифрировании аэрокосмических снимков и использовании в будущем 3D-моделирования ледника с учетом измерений подстилающей поверхности (радиозондирование). Изменение параметров ледниковых куполов архипелага Аргентинские острова говорит о возможности использования данных геодезической съемки ледниковых куполов для изучения региональных колебаний климата.

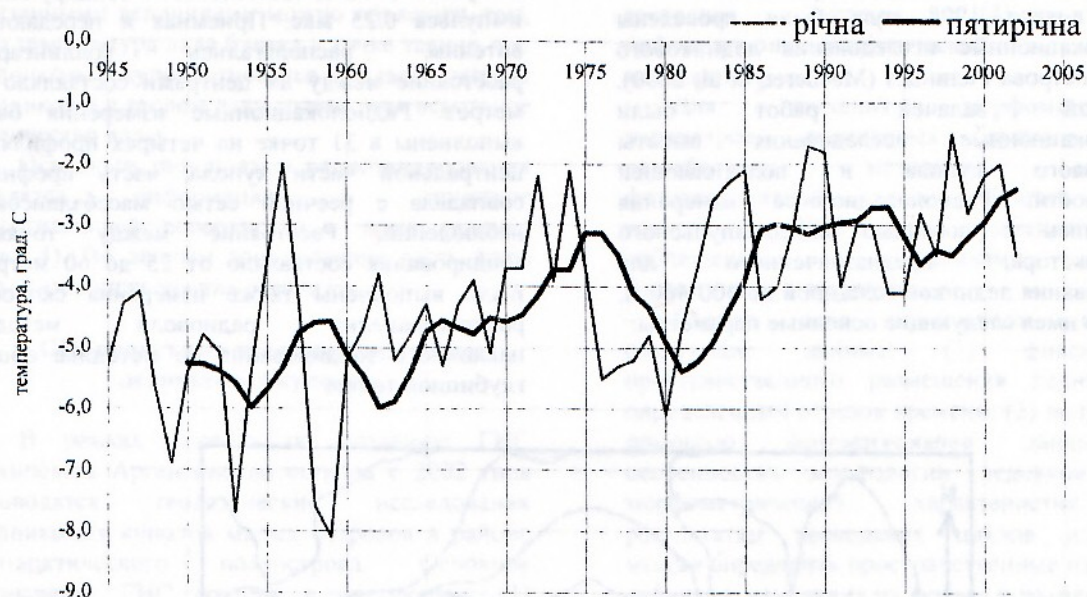


Рисунок 1. График изменения температуры воздуха по измерениям на станции Фарадей/Вернадский 1943-2003.

Исследования ледникового купола острова Галиндез.

Первые наблюдения ледникового купола острова Галиндез были проведены во время Британской экспедиции на Землю Грейама в 1934-37 гг. Аэрофотосъемка архипелага Аргентинские острова выполнена британскими исследователями в 1956 году (Thomas, 1963). Подробные гляциологические и ботанические исследования ледниковых куполов архипелага Аргентинские острова с 1960 годов выполнялись учеными Британской антарктической службы (Thomas, 1963; Corner, et al, 1973). Гляциологические наблюдения (массобаланс и движение ледника) проводились с помощью реечного снегомерного полигона и измерений положения рек с помощью геодалита. Наблюдательные пункты с известными координатами были расположены на скальных породах острова Галиндез и на прилегающих территориях. Положение каждой рейки, как правило, измерялось с трех наблюдательных пунктов. Линия от наблюдательного пункта 207 к наблюдательному пункту 204 (см. Thomas, 1963) выполняла роль базовой, и наблюдательный пункт 207 использовался, как начальный для отсчета координат всех рек. В большинстве случаев два или три независимых треугольника использовались при расчетах местоположения каждой рейки, и допустимая погрешность составила ± 2 см.

Абсолютная высота ледникового купола,

измеренная в 1934 и 1961 годах, составила соответственно 53.9 метра и 54.1 метра (Thomas, 1963). Сравнение выше приведенных данных свидетельствует о том, что его высота купола практически не изменялась в течение 26 лет. Эта информация коррелирует с данными хода температур и массобаланса за соответствующий промежуток времени. В результате исследований также установлено, что обвалы грота, расположенного на юго-западном крае ледника острова Галиндез повторяются с интервалом в 5 - 10 лет, что коррелирует с пятилетним температурным циклом (рис. 1).

Юго-западный край ледникового купола отделен от тела ледника серией небольших трещин, расположение которых очевидно предопределено строением подледникового скального основания, наибольшие трещины открываются со скоростью приблизительно 100 см/год, лед перемещается в юго-западном направлении со скоростью 80 см/год. Анализ соответствующих черт рельефа, острова Галиндез и близлежащих островов, а также скорость течения льда позволил сделать заключение о строении подстилающей поверхности ледника. Было высказано предположение, что скальные породы в северной части продольного профиля, вытянутого вдоль оси ледника, залегают практически горизонтально, а центральная часть профиля залегают под углом 15° , уклон 30° и (см. рис. 3) имеет выступ скальных пород в юго-западной части острова, вызвавший серию трещин. В соответствии с (Thomas, 1963),

пластические деформации льда предопределены строением подстилающей поверхности.

В январе 1998 года были проведены радиолокационные исследования ледникового купола острова Галиндез (Macheret, et al, 2000). Основной задачей работ были радиолокационные исследования высоты ледникового купола и подстилающей поверхности. Радиолокационные измерения проводились с помощью видеоимпульсного радиолокатора, предназначенного для зондирования ледников толщиной до 300-400 м. Локатор имел следующие основные параметры:

центральная частота 40 МГц, мощность в импульсе 5 кВт, длительность зондирующего импульса 0.25 мкс. Приемная и передающая антенны располагались коллинеарно, расстояние между их центрами составляло 26 метров. Радиолокационные измерения были выполнены в 31 точке на четырех профилях в центральной части купола, часть профилей совпадала с речной сетью массбалансовых наблюдений. Расстояние между точками зондирования составляло от 25 до 60 метров. Были выполнены также измерения скорости распространения радиоволн методом наклонного зондирования по методике общей глубинной точки.

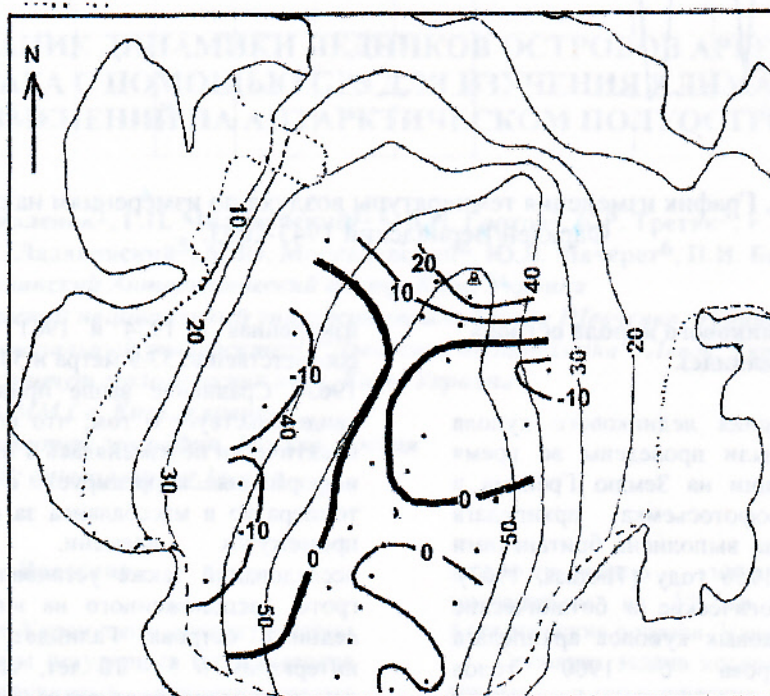


Рисунок 2. Высоты подледникового ложе по данным радиолокационных измерений.

При вычислении толщины льда принималась скорость распространения радиоволн в леднике (167,8 м/мкс), определенная по данным наклонного радиозондирования в центре ледникового купола. Результаты измерений были представлены в виде схем толщины льда и подледного рельефа. Наибольшая толщина льда составила 59 ± 1 м. По результатам измерений с учетом имеющихся данных о высоте поверхности ледникового купола, примерно на 30% его площади подледное ложе лежит ниже уровня моря, в среднем до -8 м (рис. 2). По данным наклонного радиозондирования была определена зависимость квадрата времени запаздывания t отраженных от ложа сигналов от квадрата расстояния L между центрами приемной и передающей антенн (Мачерет и др.,

1992): $t^2 = (4h^2 + L^2 \cos^2 \alpha) / V^2$, где h - эхо-глубина ложа, α - его наклон, V - средняя скорость распространения радиоволн в леднике. Полагая $Y = t^2$, $X = L^2$, $a = 4h^2 / V^2$, $b = \cos^2 \alpha / V^2$, получаем линейное уравнение с коэффициентами $Y = a + bX$ с коэффициентами a и b , которые определяются методом наименьших квадратов. Поскольку в центре купола ложе ледника практически горизонтально, т.е. $\alpha = 0^\circ$, скорость распространения радиоволн определяется из соотношения $V = (1/b)^{1/2}$, а толщина льда - из соотношения $h = (a/b)^{1/2}$. По данным наклонного радиозондирования, скорость распространения радиоволн составила $V = 167,8 \pm 2$ м/мкс. Измеренная средняя скорость распространения радиоволн в ледниковом куполе острова Галиндез несколько ниже, чем скорость в сплошном льду при температуре таяния,

оцениваемая как 168 ± 1 м/мкс (Фролов, 1998; Macheret, 2000). Небольшое отличие между указанными величинами можно объяснить тем, что температура льда близка к точке таяния, т.е. ледниковый купол относится к классу теплых ледников и в теплом льду содержится некоторое количество воды.

Основным результатом радиозондирования является информация о структуре подстилающей поверхности – ложа ледника (рис. 4). По данным зондирования часть ложа находится ниже уровня океана.

3. GIS-проект для исследований малых ледниковых куполов.

В рамках проекта по созданию ГИС архипелага Аргентинские острова с 2002 года проводятся геодезические исследования ледниковых куполов малых островов в районе Антарктического полуострова. Основное назначение ГИС состоит в следующем: (1) создании высокоточной опорной сети геодезических пунктов и обеспечение GPS-привязки всех измерений на станции Вернадский и в прилегающих районах, (2) цифровом компьютерном картографировании данных и их пространственно-временном анализе, (3) обнаружении скрытых закономерностей и аномальных явлений в

комплексной системе земля-лед-океан-атмосфера-ионосфера и прогнозирование состояния системы, (4) создании информационно-аналитической базы метаданных.

Для изучения морфометрических параметров ледниковых куполов была разработана методика наземной фототеодолитной съемки (Глотов, 2000), которая с 2002 года применяется для наблюдения за ледниками островов Аргентинского архипелага.

Съемка дает возможность получить следующие данные: (1) фиксирование пространственного размещения ледников за определенный отрезок времени; (2) получение с помощью фотоматериалов данных об особенностях морфологии ледников и их морфометрических характеристик. По результатам нескольких циклов измерений можно определить пространственные изменения ледников, изменения их формы и размеров (рис. 3), а также изменение объемов, составляющих их масс льда (Руководство, 1977).

Камеральная обработка полученных материалов проводилась на цифровой фотограмметрической станции “Дельта-2”. Рельеф ледниковых клифов был отображен в фронталах (Бруевич, 1979).

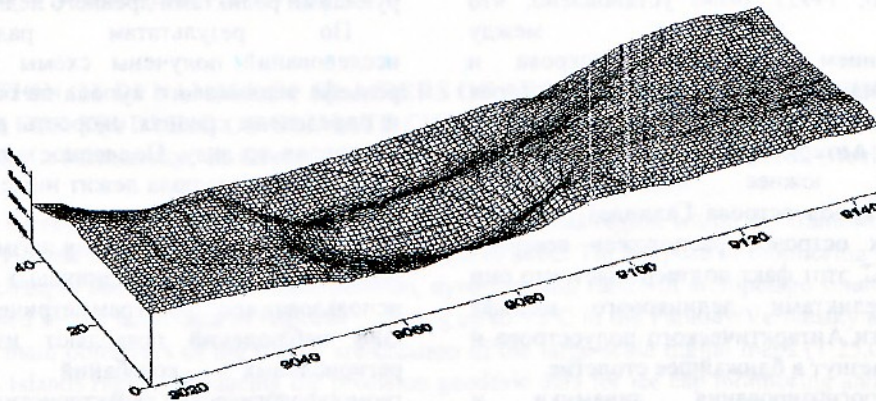


Рисунок 3. Моделирование (3D) западной части ледника по данным фотограмметрической съемки.

4. Обсуждение результатов.

Наземная фототеодолитная съемка впервые была применена для наблюдений за изменением размеров, формы и конфигурации ледниковых

куполов островов Аргентинского архипелага в 2002 году (Глотов и др., 2003). Проанализировав данные, полученные за несколько лет наблюдений, можно определить пространственные изменения ледниковых

куполов, изменения их формы и размеров, а также изменение объемов масс льда.

Сравнение результатов съемок ледникового купола острова Галиндез выполненных в 1961, 1998 и 2002 годах свидетельствует о возможной существенной абляции, происшедшей за последние десятилетия (рис. 4). В то же время, сравнение профилей, проведенных через максимальную высоту купола, дает разницу в 1 м (Глотов и др., 2003). Измерения вдоль профилей, использованных для сравнения (Thomas, 1963) и (Підготовка, 2002), показывают, что произошло выполаживание

южного края ледникового купола и его высота вдоль профиля уменьшилась в среднем на 3-4 метра (рис. 4). Учитывая то, что часть ледника по данным радиолокационного зондирования находится ниже уровня моря и за последние 5 лет зарегистрированы аномально высокие температуры воды от +1 до +4°C на станции Вернадский в декабре 2000 года (Попов и др., 2003), скорость деградации ледникового купола должна возрастать.

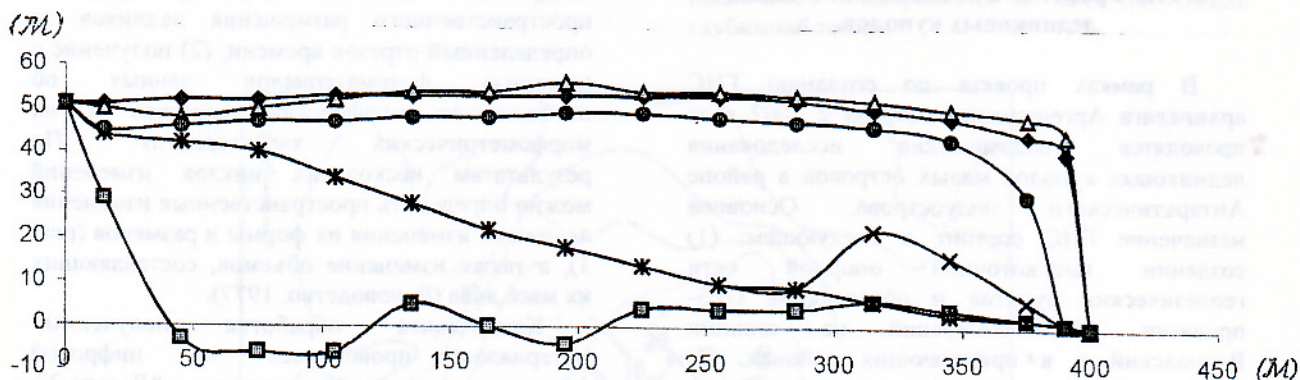


Рисунок 4. Сравнение продольных профилей съемок ледникового купола и подледникового ложа острова Галиндез выполненных в 1961, 1998 и 2002 годах. Внизу приведены профили подстилающей поверхности по данным (Thomas, 1963) (средняя кривая) и по данным радиолокационных измерений (нижняя кривая).

(Morris, et al, 1992). Было установлено, что существует корреляция между распространением ледникового покрова и значением среднегодовой температуры, которая выражается в следующем: границы ледниковых шельфов Антарктического полуострова расположены южнее изотермы -5°C. Ледниковый купол острова Галиндез и других Аргентинских островов расположен севернее изотермы -5°C, этот факт подтверждает, что они являются реликтами ледникового шельфа западной части Антарктического полуострова и возможно исчезнут в ближайшее столетие.

Для прогнозирования динамики и возможной дезинтеграции до полного исчезновения ледниковых куполов малых островов района Антарктического полуострова будут продолжены начатые с 2002 года высокоточная GPS и фотограмметрическая съемки.

Выводы.

Из исследований, проведенных в британских экспедициях 1940-1960 гг. следует, что малые ледниковые купола архипелага Аргентинские острова являются дегради-

рующими реликтами древнего ледникового щита.

По результатам радиолокационных исследований получены схемы подледникового рельефа ледникового купола на острове Галиндез и определена средняя скорость распространения радиоволн во льду. Подледное ложе примерно на 30 % площади купола лежит ниже уровня моря на отметках в среднем -8 м.

Возможности измерения размеров, формы и положения края ледниковых куполов с использованием фотограмметрической съемки и GPS наблюдений позволяют изучать влияние региональных колебаний климата на геоморфологические характеристики ледников.

По результатам современных наблюдений ледового купола о. Галиндез отмечается постоянное уменьшение его высоты, особенно в течение последних десяти лет. Ледниковый купол уменьшает свои размеры, но происходящие изменения не однородны. Если скорость изменений сохранится постоянной, то ледниковый купол может исчезнуть в течение ближайшего столетия. Полученные результаты показывают необходимость проведения постоянного мониторинга ледового купола о. Галиндез и других ледников архипелага Аргентинские острова.

Литература

1. Thomas R. H. Studies on the Ice Cap of Galindez Island, Argentine Islands. *British Antarct. Surv. Bull.*, No. 2, 1963, p. 27-43.
2. Morris, E.M., Vaughan, D.G. Snow surface temperatures in West Antarctica. In Morris, E.M. The contribution of Antarctic Peninsula ice to sea level rise. // *British Antarct. Surv. Bull.* 1992. (Ice and Climate Special report 1) P. 17-24.
3. Morris, E.M., Mulvaney R. Recent changes in the surface elevation of the Antarctic Peninsula ice sheet // *J. Gletscherkd. Glazialgeol.* 31. Part 1: 1996. P. 7-15.
4. Vaughan D.G., Marshal G.J., Connolley W.M., Parkinson C., Mulvaney R., Hodgson D.A., King J.C., Pudsey C.J., Turner J. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula // *J. Climatic Change.* 12 (2). 2002. P.1-44
5. Macheret Yu.Ya., Glazovsky A.F. 2000. Estimation of absolute water in glaciers from radar sounding data. – *Polar Research*, 19(2), 205-216.
6. Macheret Yu.Ya., Moskalevsky M.Yu., Vasilenko Ye.V. 1993. Velocity of radio waves in glaciers as an indicator of their hydrothermal state, structure and regime. – *Journal of glaciology*, 39, (132), 373-384.
7. Мачерет Ю.Я., Глазовский А.Ф., Москалевский М.Ю. и др. 1992. Строение, гидротермическое состояние и режим субполярных ледников. В кн.: *Режим и динамика полярных ледниковых покровов* (ред. Котляков). С-Пб, Гидрометеиздат, 48-115.
8. Фролов А.Д., Мачерет Ю.Я. 1998. Оценка содержания воды в субполярных ледниках по данным измерений скорости распространения радиоволн. // *МГИ*, вып. 84, 148-154.
9. 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.
10. Руководство по топографическим съемкам в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. Фототеодолитная съемка.- М.: Недра, 1977.
11. Бруевич П.Н., Кириленко В.С., Лысков Г.А. Наземная фототопографическая съемка при инженерных изысканиях. // М.: Недра, 1979.
12. Попов Ю.И., Скрыпник В.В., Тимофеев В.Е., Украинский В.В. Гидрофизические аномалии и их связь с метеорологическим режимом в районе антарктической станции Академик Вернадский в течение летних сезонов 2000-2001гг.// *Український антарктичний журнал.* №1, 2003, С. 79-84.
13. Corner R.W., Smith R.I.L. Botanical evidence of ice recession in the Argentine Islands. // *Br. Antarct. Surv. Bull.* 35. 1973. P. 83-87.
14. Глотов В.М., Коваленок С.Б., Милиневский Г.П., Накалов Е.Ф., Фулитка Ю.В. Мониторинг малых ледников как индикаторов изменений климата в районе Антарктического полуострова. // *Український антарктичний журнал.* №1, 2003, С. 93-98.
15. Підготовка та проведення 6-ої Української антарктичної експедиції. // *Звіт. Український антарктичний центр.* – 2002. - №0101U002097. - 145 с.

INVESTIGATION OF DYNAMICS OF GLACIERS OF ARGENTINE ISLANDS ARCHIPELAGO USING GPS FOR STUDYING OF CLIMATE CHANGES ON THE ANTARCTIC PENINSULA
S. Kovalenok, G. Milinevsky, R. Greku, V. Glotov, K. Tretyak, Y. Ladanovsky, M. Moskalevsky, Y. Macheret, P. Bahmach

The geodesy survey of small island ice caps in Antarctic Peninsula region within the framework of the GIS project for the Argentine Islands archipelago has been started in 2002. The purpose of monitoring is the possible regional climate changes observation on shape, position, dynamics and future of archipelago small ice caps. The task was determined by the latest data of regional warming up to +5°C in the Faraday/Vernadsky area during the last century. The main objectives of the survey are creation of the large-scale digital maps (1:25,000 – 1:1,000) for the Argentina Islands region, producing the precision geodesic data for ice cap monitoring and the evolution model creation. The geomorphology monitoring of the ice caps is based on the GPS and photogrammetric survey. The data of fifty years meteorological observations and tide data at Faraday/Vernadsky station, long-term variability in sea-ice extent/thickness, monitoring of ozone layer and UV energy flow, hydrological measurements provided at Vernadsky, the upper atmosphere changes measurements over Antarctica, the botanical evidence of climate changes are the additional sources for climate pattern of Antarctic Peninsula. The changes of size, shape, deformation, moving velocity and the edge position of ice caps on Argentine Islands archipelago shows the possibility to use the geodetic survey data of the ice cap for the regional climate variability study. The research is based on historical data ice cap observation of Galindez Island and other islands in the area. On the base the photogrammetric survey the large-scale digital map (1:1,000) of the Marina Point of Galindez Island was created.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЛЬДОВИКІВ АРГЕНТИНСЬКОГО АРХІПЕЛАГУ З
ДОПОМОГОЮ GPS ДЛЯ ВИВЧЕННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА АНТАРКТИЧНОМУ
ПІВОСТРОВІ**

**С. Ковальонук, Г. Мінілевський, В. Глотов, К. Третьак, Р. Греку, Ю. Ладановський,
М.Москалевський, Ю. Мачарет, П. Бахмач**

В рамках проекту створення ГІС архіпелагу Аргентинські острови у 2002 році запроваджено геодезичні дослідження льодовикових куполів малих островів району Антарктичного півострова. Мета роботи – прогноз регіональних змін клімату на базі точних даних з динаміки льодовикових куполів малих островів архіпелагу. За останніми даними метеорологічних спостережень, регіональне потепління складає +5°C за останнє століття на станції Фарадей/Вернадський. Основні задачі досліджень - створення великомасштабних цифрових карт (1:25,000 - 1:1,000) архіпелагу Аргентинські острови, одержання точних геодезичних даних для гляціогеоморфологічного моніторингу динаміки льодовикових куполів та створення моделі їх розвитку. Геоморфологічний моніторинг льодовикових куполів базується на фотограмметричній зйомці і GPS спостереженнях. Довгострокові спостереження за температурою морської води, моніторинг озонного шару та потоку ультрафіолетового випромінювання, гідрологічні дослідження, ботанічні дані, отримані на станції Фарадей/Вернадський - додаткові джерела інформації для прогнозу змін клімату на Антарктичному півострові. Зміни морфологічних і морфометричних даних льодовикових куполів архіпелагу Аргентинські острови свідчать про можливості використання даних геодезичних спостережень льодовикових куполів для вивчення регіональних змін клімату. В роботі використані дані спостережень льодовикового купола острову Галіндез та інших островів архіпелагу Аргентинські острови, що виконані у 50-60 роках. На базі фотограмметричної зйомки побудована великомасштабна карта (1:1,000) західної частини льодовикового купола острова Галіндез.