

До 100-річного ювілею Національної академії наук України



УДК 551.1(504.064.3:574)(477)(99)

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2019.1.159236>

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТДЕЛА ГЕЛОГИИ И ГЕОЭКОЛОГИИ АНТАРКТИКИ ИНСТИТУТА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК НАН УКРАИНЫ

**П.Ф. Гожик¹, Р.Х. Греку², В.И. Богилло³, М.С. Базилевская⁴,
К.Ю. Ткаченко⁵, Т.Р. Греку⁶**

¹ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: info@igs-nas.org
Академик НАН Украины, директор ИГН НАН Украины, заведующий отделом геологии и геоэкологии Антарктики.*

² *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: r.greku@gmail.com
Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.*

³ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: bazilevskaya1955@gmail.com
Кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник.*

⁴ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: bazilevskaya1955@gmail.com
Кандидат химических наук, старший научный сотрудник.*

⁵ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: tkachenko.katya@gmail.com
Кандидат химических наук, старший научный сотрудник.*

⁶ *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина, E-mail: threku@gmail.com
Кандидат геологических наук, научный сотрудник.*

Исследования в области наук о Земле сегодня не ограничиваются традиционными геолого-геофизическими изысканиями земных недр. В Институте геологических наук – старейшей научной базе НАН Украины – в свое время были созданы самостоятельные центры для углубленных геологических исследований территории Украины. Очевидно, что даже народно-хозяйственные задачи Украины не решаются без учета глобальных проблем состояния и изменчивости среды. В 2041 г., когда закончится действие Международного соглашения по Антарктике, потребуются всесторонние знания о состоянии геологической среды нашей планеты.

Именно к такому этапу развития международных отношений украинская наука была подготовлена, когда 20 лет назад взяла на себя обязательства проводить исследования в Антарктике, изучать осадочные образования как источник информации о предшествующих и будущих изменениях климата, прогнозировать месторождения полезных ископаемых. Особую значимость в этих исследованиях приобретают спутниковые радарные всепогодные наблюдения удаленных и труднодоступных районов Антарктики, позволяющие анализировать поверхность земли и океана, а также глубинное строение Земли по разработанному в Институте геологических наук НАН Украины методу гравитационной томографии, позволяющему определять аномалии плотности во всем диапазоне глубин Земли. В работе приводятся лишь некоторые результаты геологических и геоморфологических исследований для районов Украины и Антарктики.

Ключевые слова: Антарктида; спутники; тектоническая геоморфология; климат; ледовый керн; озон; бром; аэрозоли; снежный покров; фреоны.

THE MAIN RESEARCH DIRECTIONS OF THE DEPARTMENT OF GEOLOGY AND GEOECOLOGY OF THE ANTARCTIC OF THE INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES OF NAS OF UKRAINE

**P.F. Gozhik¹, R.Kh. Greku², V.I. Bogillo³, M.S. Bazylevska⁴,
K.Yu. Tkachenko⁵, T.R. Greku⁶**

¹ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: info@igs-nas.org
Academician of the NAS of Ukraine, Head of the Department of Geology and Geoecology of the Antarctic.*

² *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: r.greku@gmail.com
Candidate of physical and mathematical sciences, senior scientific worker.*

© П.Ф. Гожик, Р.Х. Греку, В.И. Богилло, М.С. Базилевская, К.Ю. Ткаченко, Т.Р. Греку, 2019

³ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: bazilevskaya1955@gmail.com
Candidate of chemical sciences, leading researcher.*

⁴ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: bazilevskaya1955@gmail.com
Candidate of chemical sciences, senior scientific worker.*

⁵ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: tkachenko.katya@gmail.com
Candidate of chemical sciences, senior scientific worker.*

⁶ *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, E-mail: threku@gmail.com
Candidate of geological sciences, scientific researcher.*

Research in the field of earth sciences today is not limited to traditional geological and geophysical surveys of the earth's interior. The Institute of Geological Sciences, the oldest scientific base of the National Academy of Sciences of Ukraine, at one time created independent centers for advanced geological research of the territory of Ukraine. It is obvious that even the national economic tasks of Ukraine are not solved without taking into account the global problems of the state and environmental variability. In 2041, when the International Agreement on the Antarctic ends, comprehensive knowledge of the state of the geological environment of our planet will be required.

It was precisely to this stage of development of international relations that Ukrainian science was prepared when 20 years ago it assumed obligations to conduct research in Antarctica, study sedimentary formations as a source of information about previous and future climate changes, and predict mineral deposits. Satellite radar all-weather observations of remote and hard-to-reach areas of the Antarctic, which make it possible to analyze the surface of the earth and ocean, as well as the deep structure of the Earth according to the gravitational tomography method developed at the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, which allows determining the density anomalies throughout the depth range of the Earth, are of particular importance in these studies. The paper presents only some results of geological and geomorphological studies for the regions of Ukraine and the Antarctic.

An importance of development not only geology of Ukraine, but also Sciences of the Earth of the all planet, including Antarctica, is noted within the real work of the Institute of geological sciences. The wide use of satellite data and methods for restoring of a deep structure of the Earth contribute to this. Such approaches for solving practically important problems of the resources studying and environmental problems of Ukraine, as well as solving the fundamental problems of the Earth sciences, are shown in the example of remote and hard-to-reach areas of the Antarctic.

Key words: The Antarctic; satellites; Tectonic Geomorphology; climate; ice core; ozone; bromine; aerosol; ice cover; freon.

ОСНОВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІДДІЛУ ГЕОЛОГІЇ ТА ГЕОЕКОЛОГІЇ АНТАРКТИКИ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАН УКРАЇНИ

**П.Ф. Гожик¹, Р.Х. Греку², В.І. Богилло³, М.С. Базилевська⁴,
К.Ю. Ткаченко⁵, Т.Р. Греку⁶**

¹ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: info@igs-nas.org
Академік НАН України, директор ІГН НАН України, завідувач відділу геології та геоєкології Антарктики.*

² *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: r.greku@gmail.com
Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.*

³ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: bazilevskaya1955@gmail.com
Кандидат хімічних наук, провідний науковий співробітник.*

⁴ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: bazilevskaya1955@gmail.com
Кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник.*

⁵ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: tkachenko.katya@gmail.com
Кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник.*

⁶ *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна, E-mail: threku@gmail.com
Кандидат геологічних наук, науковий співробітник.*

Дослідження в галузі наук про Землю сьогодні не обмежуються традиційними геолого-геофізичними дослідженнями земних надр. В Інституті геологічних наук – найстарішій науковій базі НАН України – свого часу були створені самостійні центри для поглиблених геологічних досліджень території України. Очевидно, що навіть народно-господарські завдання України не вирішуються без урахування глобальних проблем стану і мінливості середовища. У 2041 р., коли закінчиться дія Міжнародної угоди по Антарктиці, будуть потрібні всебічні знання про стан геологічного середовища нашої планети. Саме до такого етапу розвитку міжнародних відносин українська наука була підготовлена, коли 20 років тому взяла на себе зобов'язання проводити дослідження в

Антарктиці, вивчати осадові утворення як джерело інформації про попередні і майбутні зміни клімату, прогнозувати родовища корисних копалин. Особливу значущість в цих дослідженнях набувають супутникові радарні всепогодні спостереження віддалених і важкодоступних районів Антарктики, що дозволяють аналізувати поверхню землі та океану, а також глибинну будову Землі за розробленим в Інституті геологічних наук НАН України методом гравітаційної томографії, що визначає аномалії щільності у всьому діапазоні глибин Землі. В роботі наводяться лише деякі результати геологічних і геоморфологічних досліджень для районів України та Антарктики.

Ключові слова: Антарктида; супутники; тектонічна геоморфологія; клімат; льодовий керн; озон; бром; аерозолі; сніговий покрив; фреони.

Введение

В последний период 100-летнего развития Национальной академии наук Украины, наряду с традиционными научными задачами, определилось новое стратегическое направление – изучение континента Антарктиды и прилегающего к ней Южного океана. 26 лет назад специальным постановлением Президента Украины это направление было определено как государственная задача.

В настоящее время завершается выполнение второй Государственной десятилетней программы исследований Украины в Антарктике на 2011-2020 гг. Эта комплексная программа выполняется институтами НАН Украины, Гидрометслужбы и других ведомств и включает исследования по геологии и геофизике (фундаментальные исследования и ресурсы), биологии, климату и радиоастрономии. Используется опыт исследований специалистов и ученых Украины в первых советских антарктических экспедициях, а также в исследованиях Мирового океана на научно-исследовательских судах НАН Украины.

Задачи геологического направления стали основой отдела геологии и геоэкологии Антарктики Института геологических наук (ИГН) НАН Украины (руководитель – академик НАН Украины П.Ф. Гожик). Исследования в отделе согласуются с задачами, которые определяются международным сообществом в рамках проектов Международного научного комитета SCAR. Основой такой кооперации являются непосредственные полевые исследования на континенте и морские съемки вокруг Антарктиды. Выполняя эти условия, ИГН НАН Украины активно участвовал в исследованиях «Международного полярного года 2007-2008» и его продолжении в 2009 г., в частности в кооперации с другими 14-ю странами по проекту консорциума POLENET (США). Как результат в 2009 г. был издан Атлас глубинного строения Антарктики по данным метода гравитационной томографии (Atlas of the Antarctic deep structure with the Gravimetric Tomography).

С 2006 г. по предложению Международного комитета SCAR начались работы по созданию новой Международной батиметрической карты Южного океана IBCSO, охватывающей акваторию океана вокруг Антарктиды до 60° ю.ш. ИГН НАН Украины при поддержке Национального антарктического научного центра Украины предоставил результаты своих исследований рельефа дна в этом районе и был включен в состав Редакционного совета карты из девяти стран. Издание карты завершилось в 2014 г. [The International..., 2013].

Значительное внимание ученые ИГН уделяют продолжению прямых геологических исследований прежде всего в районе архипелага Аргентинских островов, который является примером уникальных особенностей геологической структуры Западной Антарктики. В основе таких исследований лежат фундаментальные результаты исследований, изложенные в коллективной монографии «Структура і динаміка геофізичних полів у Західній Антарктиці» [Бахмутов та ін., 2017], подготовленной рядом институтов, включая ИГН НАН Украины.

Информативным источником геолого-геофизических данных в этот же период стали радарные спутниковые наблюдения, которые в удаленных и труднодоступных районах Антарктики и в условиях продолжительной полярной ночи представляются исключительно важными.

Вместе с тем морские съемки на научно-исследовательских судах и спутниковые наблюдения относятся лишь к поверхностным характеристикам материков и океанов. Чтобы «заглянуть» внутрь Земли и показать связь информации, видимой со спутников, с глубинным строением, использован разработанный, как уже сообщалось, метод гравитационной томографии на основе данных геоида. Характеристики современной модели геоида EGM2008 позволяют восстанавливать строение Земли как для Антарктики, так и для территории Украины.

Помимо традиционных геологических задач южно-полярного региона, важнейшей современной проблемой Антарктики является изменение климата планеты. В отделе выполнен ряд уникальных исследований, связанных с физико-химическими процессами взаимодействия снежно-ледового покрова Антарктиды с атмосферой.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты, полученные по указанным направлениям.

Детальный альтиметрический геоид и основные геотектонические структуры Черного моря

Особое внимание в ИГН НАН Украины уделяется радиолокационным съемкам: радарная альтиметрия морских акваторий для прямых определений топографии детального геоида, лазерная альтиметрия для исследования изменчивости топографии снежного покрова и радарная интерферометрия для исследования топографии и малых смещений земной поверхности и ледового покрова. В работах используются данные спутников ERS1, ERS2 и Sentinel-1, предостав-

ленные Европейским космическим агентством в рамках гранта АО358 по проекту «Исследование топографии и динамики ледового покрова Антарктического полуострова, а также топографии и особенностей смещения земной поверхности на территории Украины с использованием технологии радиолокационной интерферометрии».

Детальная топография морской поверхности Черного моря построена по данным радиолокационной альтиметрии ИСЗ ERS1 (Геодезическая миссия). Было использовано 4000 траекторий с 12 000 измерений высот морской поверхности; среднеквадратическая погрешность по 3000 траекторных пересечений составила ± 10 см. Пространственное разрешение регулярной сетки – 3 км. Высоты полного геоида относительно эллипсоида уменьшаются от 35 м на западе у берега Болгарии до 14 м на востоке у кавказского побережья. Геострофические возвышения морской физической поверхности, как отклонения от геоида вызванные течениями, находятся в пределах 3-12 см для различных районов и сезонов. На рис. 1 показана топография дифференциального геоида как разница между спутниковыми

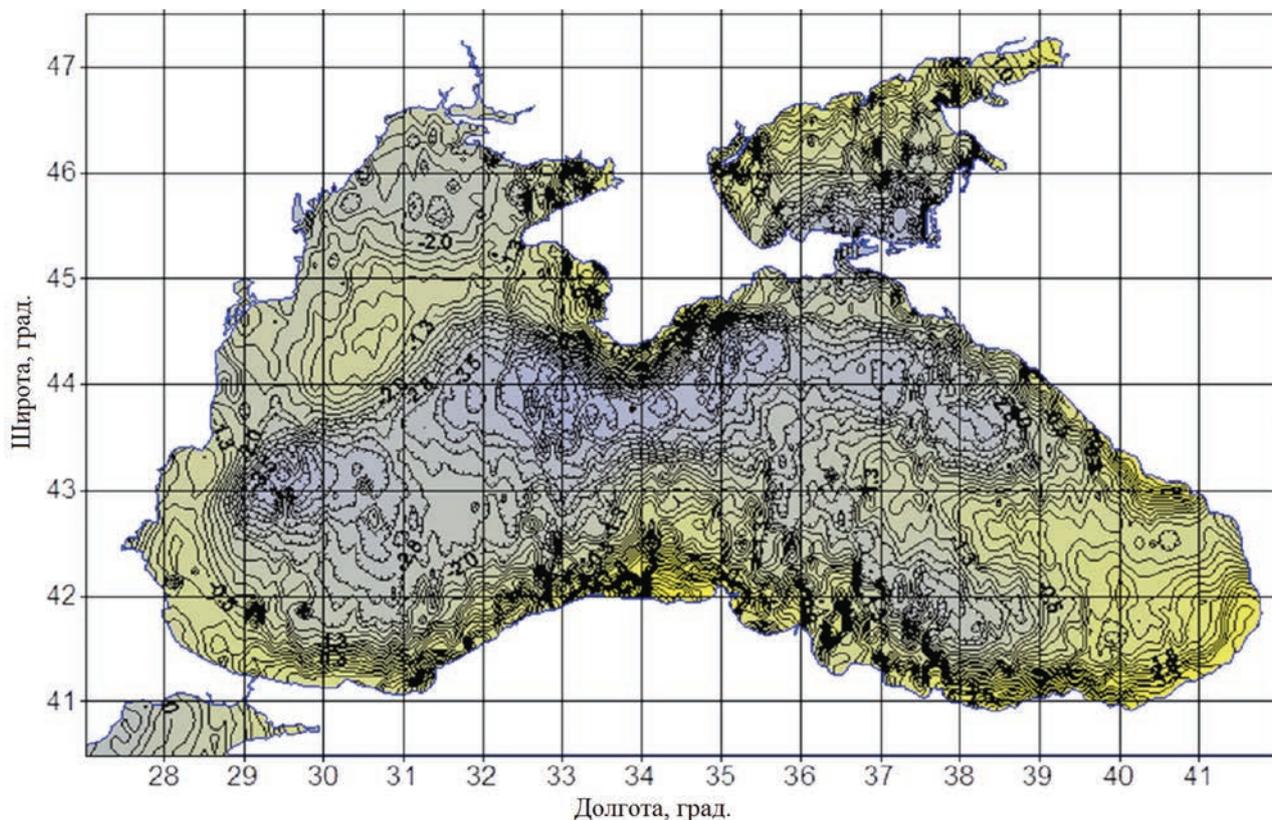


Рис. 1. Дифференциальный геоид Черного моря. Интервал между изолиниями 0,2 м. Синий цвет – понижения, желтый – возвышения

Fig. 1. Differential geoid of the Black Sea as a difference between the altimeter geoid and the OSU91A model. Interval between isolines is 0.2 m. Blue color is less dense structures, yellow color is more dense structures

альтиметрическими измерениями и глобальной моделью геоида OSU91A. Здесь хорошо видны известные структуры литосферы Черного моря.

Северо-западный шельф Черного моря известен как нефтегазоносный район. Проседания геоида коррелируют с разуплотненными структурами морского дна, которые, в свою очередь, могут быть накопителями углеводородов. 80% выявленных отрицательных структур геоида совпадают с известными по геофизическим данным продуктивными структурами. Выявлены также новые перспективные участки, не обнаруженные ранее, в частности, в мелководных районах, где морские геофизические съемки затруднены.

Томографический разрез глубинного строения по 34° в.д. и отсутствие изостазии Крымских гор

Крымские горы, как известно, являются нескомпенсированными структурами с точки зрения изостатического равновесия. Подтверждением тому является значительная величина гравитационных аномалий в свободном воздухе до 120 мГал, а также относительно небольшое, менее 100 км, поперечное сечение. Горы удерживаются на поверхности благодаря жесткости упругой плиты литосферы и практически не прогибают ее.

На рис. 2 показан разрез плотностных неоднородностей до глубины 15 км по данным томографического моделирования вдоль мери-

диана 34° в.д. в Черном море. Визуально подтверждается, что Крымские горы изостатически не скомпенсированы и поддерживаются восходящими глубинными массами.

В южной части Крымского полуострова обнаружен подвиг субокеанической литосферы Черного моря, который распространяется на глубинах 5-6 км на расстояние до 100 км под полуостровом. Наблюдается активный подъем литосферных масс Черного моря от глубины 7,5 км до глубины 3,9 км. Это явление подтверждает точку зрения о нарушении изостатического равновесия Крымских гор. Горы здесь не имеют глубоких корней, удерживаются на жесткой литосфере и даже воздымаются под действием тектонических сил, связанных с динамическим подпором черноморской литосферы. В свою очередь, массы Горного Крыма распространяются на юг до 80 км в акваторию Черного моря на глубине 6,5-7 км.

Малые смещения поверхности Крымского полуострова по данным спутниковой радарной интерферометрии

Крымский полуостров является сейсмоактивным районом, где, по мнению сейсмологов, интенсивность тектонических процессов в толще земной коры нарастает. В результате сейсмического влияния землетрясений в горах возникают оползни и обвалы. Сильные разрушения

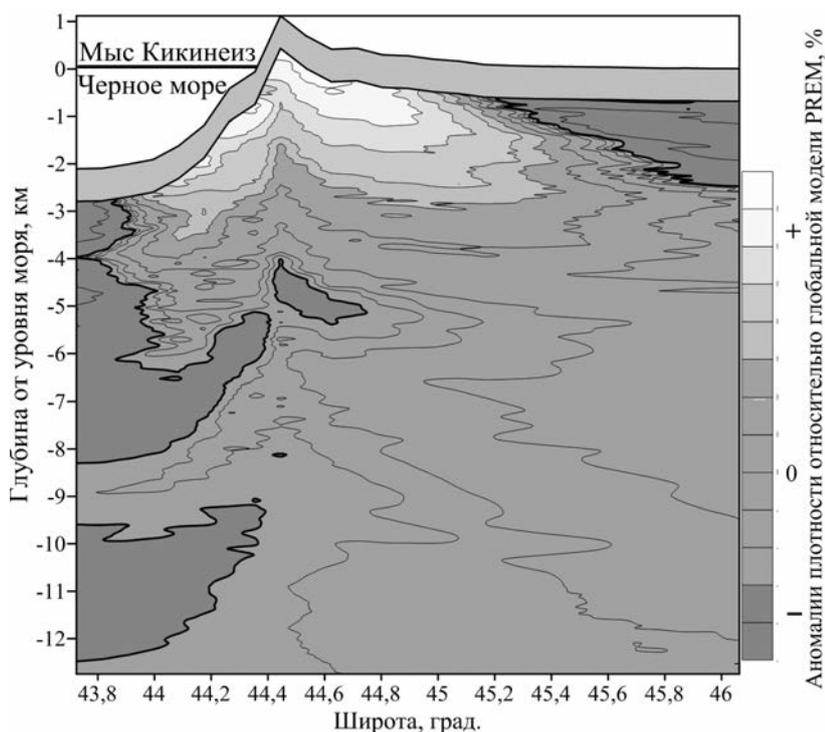


Рис. 2. Фрагмент плотностного разреза по 34° в.д. на район мыса Кикинеиз Крымских гор. Высоты и глубины показаны от уровня моря

Fig. 2. Tomographic section of density anomalies along meridian 34°E in the Black Sea and the Crimean Mountains. The uplifting of the Crimean Mountains is provided by the active ascent of less dense masses (blue color) of the suboceanic lithosphere of the Black Sea

наблюдаются и в городах степной зоны полуострова. Регион Крымского полуострова также был обеспечен спутниковыми наблюдениями ИСЗ ERS-1 (04.11.1995) и ERS-2 (10.01.2010). Результаты обработки пары снимков с интервалом 15 лет по технологии дифференциальной интерферометрии D-InSAR [Ferretti, Monti-Guarnieri et al., 2007] приводятся на рис. 3.

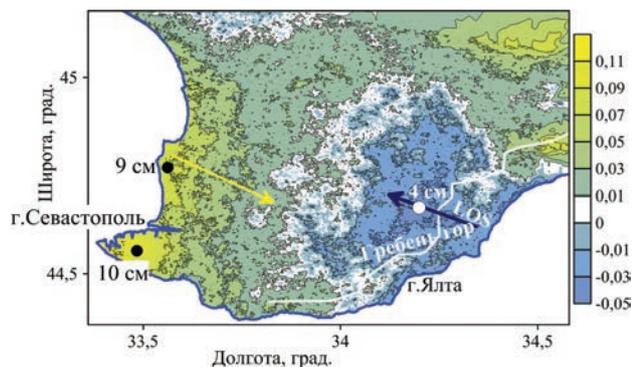


Рис. 3. Карта смещений земной поверхности на Крымском полуострове по спутниковым радиолокационным снимкам ИСЗ ERS-1 (04.11.1995) и ERS-2 (10.01.2010). Справа – шкала смещений (в м). Обработка снимков выполнена по технологии дифференциальной интерферометрии DInSAR

Fig. 3. Line-of-site (LOS) displacement map in Crimea with the ERS1/2 DInSAR technology (November 4, 1995 and ERS-2 January 10, 2010). The scale of displacements in meters is on the right

Смещения в Крыму по всей площади снимков 100×100 км показаны в двух противоположных направлениях. В узкой прибрежной полосе Горного Крыма величина сдвига находится в пределах 0÷–1,7 см. Собственно Горный Крым смещается на северо-запад вдоль направления излучаемого сигнала на величину –2,0÷–4,7 см в полосе шириной ~15-18 км. Максимальные значения около –5,0 см относятся к гребневой зоне хребта Крымских гор в районе горы Роман-Кош на высоте 1545 м. Центральная часть (светлый оттенок) характеризуется малыми величинами смещения –1÷+1 см.

Горизонтальное смещение в противоположном юго-восточном направлении находится в западной части полуострова. Интенсивность подвижек в течение 15 лет в районе г. Севастополь и мыса Херсонес достигает 10 см.

Геодинамическое обоснование на Крымском полуострове традиционно связывается с воздействием многочисленных гипоцентров землетрясений, окружающих полуостров с востока, юга и запада в Черном море. Наибольший объем

данных относится к восточной и южной акваториям полуострова. В работе [Гончар и др., 2007] предполагается, что в западной части Крыма основное влияние оказывает Карпатский орогенный пояс. Западный бассейн Черного моря как микроплита, отделившаяся от Мизийской и Скифской плит, двигалась в юго-восточном направлении. В результате геодезических GPS наблюдений определены векторы смещения земной поверхности со скоростью 2-3 см/год по направлению восток–северо-восток для района Крыма.

Томографическое моделирование и геодинамические надвиги на Крым с запада (Динариды) и востока (северо-западный Кавказ)

Чтобы получить подтверждение наблюдаемых с помощью спутников подвижек земной поверхности, по методу гравитационной томографии была рассчитана и построена томографическая модель глубинного строения литосферы по вертикальному разрезу от северной Адриатики через район Крымских гор до северного Кавказа (рис. 4, а, черная ломаная линия). Фоном на этой карте для южного европейского региона показана томографическая модель распределения аномалий плотности по горизонтальному сечению на глубине 700 м. По разрезу проявилась цепь уплотненных аномалий (желтый цвет) от Адриатики до Крыма. Белым крестиком отмечена зона очагов землетрясений Вранча.

На вертикальном разрезе (рис. 4, б) до глубины 10 км вдоль этой цепи по контурам аномалий плотности хорошо видна структура горных массивов Динариды-Балканиды. Далее по уплотненному краю северо-западного шельфа до глубин 6-7 км хорошо заметна тенденция смещения структур на восток (диапазон долготы 28°-30°). Далее 30° в.д. начинается зона надвига на западном склоне полуострова в районе мыса Херсонес. Здесь на глубинах от 0,5 до 2 км пограничная область контакта представлена крупными блоками обломочного материала.

Глубинная структура полуострова показана как область разуплотнения синим цветом. Восточная оконечность Крымских гор уходит в акваторию южнее Керченского полуострова и сталкивается с отрогами северо-западного Кавказа, что отмечено зоной сжатия изолиний на долготы ~37,5°.

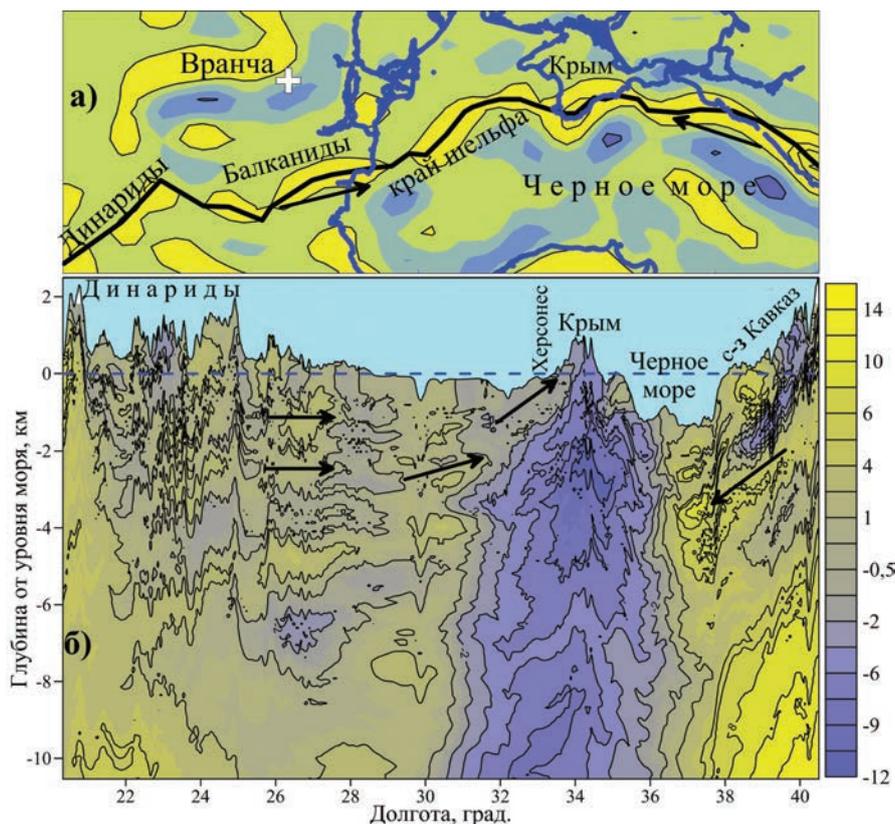


Рис. 4. Положение (а) и вертикальный томографический разрез (б) распределения аномалий плотности до 10 км от поверхности земли и морского дна. Шкала показывает значения аномалий плотности относительно глобальной модели PREM 1981 (в %)

Fig. 4. The position (a) and tomographic cross-section (б) of dense anomalies up to the depth of 10 km. The scale on the right shows the dense anomalies as a percentage relative to the PREM 1981 model (%)

Геодинамические подвижки в районе Чернобыльской АЭС по спутниковым и томографическим данным

В настоящий период тридцатилетия аварии Чернобыльской АЭС в большей степени чем прежде отмечается, что причина катастрофы имеет не чисто техногенный характер, а связана с природными геотектоническими явлениями. Район Бело-русско-Украинского Полесья подвергается воздействию достаточно сильной сейсмической активности, которая связана с зоной геологических разломов и сопровождается проседаниями земной поверхности. Для определения интенсивности смещений использована интерферометрическая технология DInSAR по паре снимков на восходящих орбитах ИСЗ ERS2 за период 20 месяцев от 18.08.1997 г. до 05.04.1999 г. Перпендикулярная базовая линия между спутниками составляет –495,4 м.

На рис. 5 показана карта горизонтальных смещений по спутниковым данным. Интенсивность смещений в районе 4-го энергоблока ЧАЭС составила 7,4 см за время между съемками. Максимальные деформации в пределах снимка достигают 15 см в северо-восточном направлении и 10 см в юго-западном. Изолинии на карте проведены через 2 см. Вертикальные проседания в

районе имеют тот же порядок величин, что и горизонтальные смещения. Отрицательные величины в этом случае означают проседания, а положительные – возвышения.

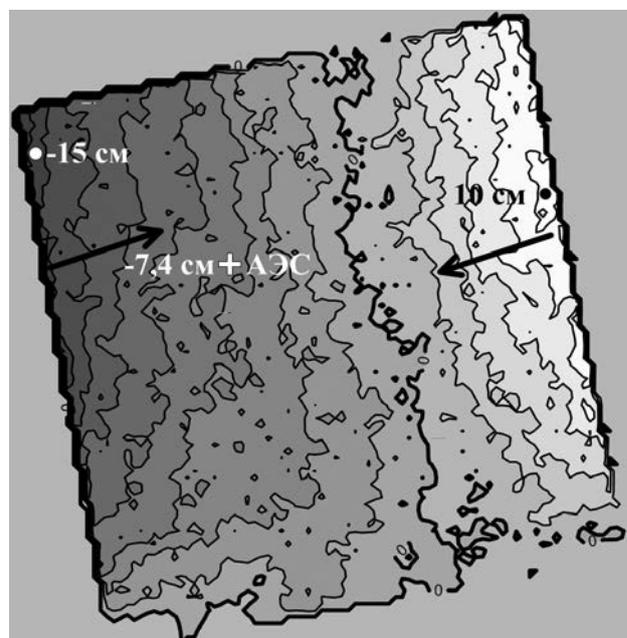


Рис. 5. Горизонтальные смещения земной поверхности по результатам радарной съемки ИСЗ ERS2(18.08.1997 – 05.04.1999). Изолинии нанесены через 2 см

Fig. 5. Horizontal displacement of the earth surface with the ERS2 (18.08.1997 – 05.04.1999). The interval of isolines is 2 cm

Для выявления геодинамических причин таких деформаций рассчитаны и построены томографические модели глубинной структуры плотностных аномалий. На рис. 6 показано латеральное распределение аномалий плотности геологических структур на глубине 680 м. Обращают внимание два участка более частого расположения изолиний в центральной части снимка на аномалии с пометкой 10 см. Уплотнения изолиний характеризуют зоны сжатия. Подобные интенсивные контактные области геологических структур наблюдаются лишь в тектонически активных районах коллизии горных Карпат с континентальными платформами. Именно в такой напряженной области расположена Чернобыльская АЭС (показана красным крестиком).

На рис. 7 показана структура аномалий плотности по вертикальному разрезу. Белой линией отмечено направление потока разуплотненных масс (темно-серый цвет) с востока и запада на глубинах 6–6,5 км. На долготе 29° начинается подъем масс к поверхности. Этот процесс вы-

зывает раздвижение более плотных аномалий (белый цвет) и формирование зоны сжатия на глубинах менее 2 км. Разуплотненные массы, вероятно, насыщены углеводородами. Подтверждением этому может служить известное эксплуатируемое месторождение нефти на территории Беларуси вблизи с границей Украины.

Геологическое строение и геодинамические особенности верхних слоев морского дна Керченского пролива по координатам построенного моста

Разработанная в ИГН НАН Украины технология томографического гравитационного моделирования позволяет на базе детальных современных моделей геоида восстановить глубинную структуру и геодинамику различных слоев Земли от поверхности до 5300 км (верхняя граница внешнего ядра).

Выполнены расчеты и построена детальная томографическая модель аномалий плотности по трассе Керченского моста (рис. 8). Как отмечалось многими геологами, по модели показано

Рис. 6. Распределение аномалий плотности по латеральному сечению на глубине 680 м. Темно-серый цвет – менее плотные аномалии, белый – более плотные. Белая линия – положение вертикального разреза аномалий плотности на рис. 7

Fig. 6. The lateral section of dense anomalies at the depth of 680 m. Chernobyl NPP is a red mark. Black color is the less dense anomalies, white color is more dense. The white line is the position of the cross-section in Fig. 7

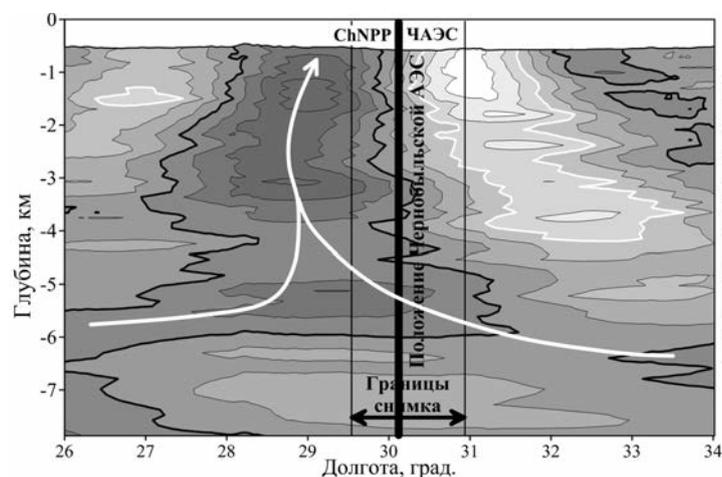
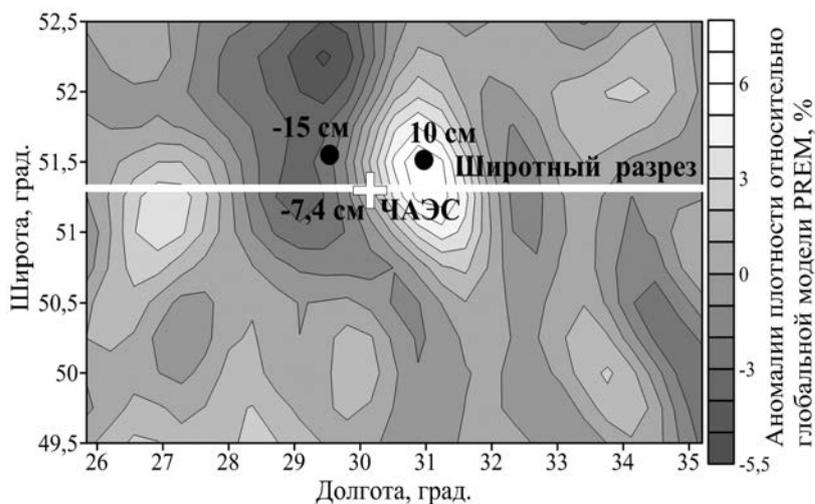
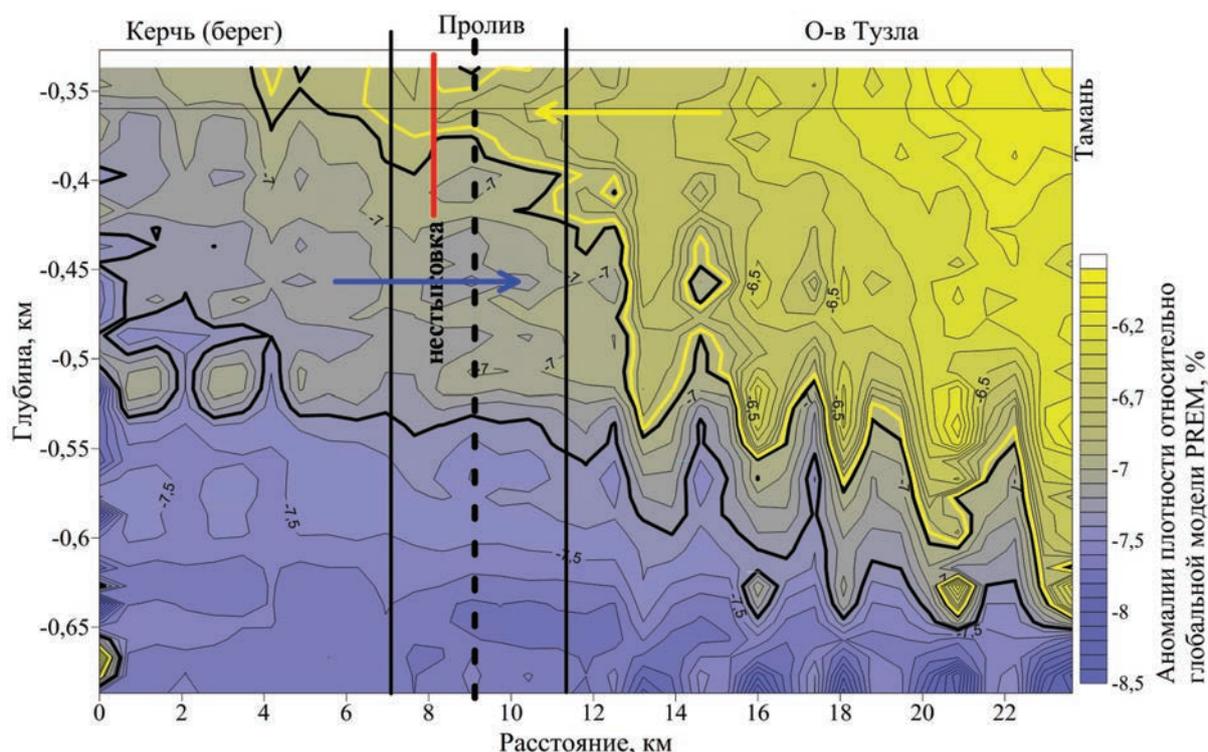


Рис. 7. Вертикальное распределение аномалий плотности по широтному разрезу через Чернобыльскую АЭС на рис. 6. Аномалии приведены в процентах от значений плотности масс на соответствующих глубинах по модели PREM 1981

Fig. 7. Tomographic cross-section of dense anomalies along the latitudinal cross-section through the Chernobyl NPP in Fig. 6. The anomalies are the percentage relative to the PREM 1981 model



сложное крайне неустойчивое сопряжение геологических масс в противоположных направлениях. Со стороны Керченского полуострова наблюдается субдукция (погружение) в направлении запад–восток (синяя стрелка), а со стороны Тамани – надвиг восток–запад (желтая стрелка). В такой геодинамически активной ситуации не может быть обеспечена стабильность сооружения.

Красная вертикальная линия сверху показывает место стыковки двух конструкций моста, которые строились с противоположных сторон сооружения.

Исследования в Антарктике

Начиная с 2000 г. Национальная академия наук Украины продолжила исследования в Антарктике на базе Украинской антарктической станции Академик Вернадский. Комплексные исследования в одной точке на станции Академик Вернадский были дополнены спутниковыми данными, которые предоставлялись Европейским космическим агентством в рамках проекта АО358. Опыт совместного использования спутниковых наблюдений в комплексе с методом гравитационной томографии по территории Украины и акватории Черного моря был распространен также в Антарктике.

Рис. 8. Томографическая модель геологической структуры аномалий плотности морского дна по линии Керченского моста, незаконно построенного РФ. В расчетах использованы данные геоида EGM2008 с гармониками разложения до 2190 порядка и степени и пространственным разрешением 1 σ

Fig. 8. Tomographic model of the seabed geological structure along the line of the Kerch bridge. The EGM2008 geoid data were used including the spherical harmonics up to 2190 order and degree and spatial resolution of 1 σ . Depth up to 680 m



Метод гравитационной томографии для восстановления внутренней структуры Земли

Известным информативным источником данных глубинного строения Земли является метод сейсмической томографии, в котором используются сигналы землетрясений и взрывов. Наш метод гравиметрической томографии основан на реализации теоретического подхода профессора Г. Морица [Мориц, 1994], заключающегося в том, что эквипотенциальные поверхности Земли совпадают с поверхностями постоянной плотности, а также на использовании его алгоритма определения гармонических плотностных аномалий через сферические гармоники гравитационного потенциала.

Данные геоида в виде коэффициентов сферических функций гравитационного потенциала представляются информативным источником для геолого-геофизических исследований внутреннего строения Земли [Мориц, 1994; Turcotte et al., 2002; Majdański et al., 2009]. Используя алгоритм решения обратной гравиметрической задачи [Мориц, 1994], рассчитываются аномальные гармонические плотности, которые обуславливают возмущающий потенциал глубинных масс на известной поверхности геоида. Величина потенциала, возмущенного притягивающим телом, как известно, прямо пропорциональна массе тела и обратно пропорциональна расстоянию. Основной вклад в величину потенциальной энергии на поверхности Земли вносят глубинные слои внутреннего и внешнего ядра и нижней мантии.

Аномальные гармонические плотности могут быть рассчитаны, используя сферические гармоники возмущающего потенциала из гравитационной модели геоида, такой как EGM96 или EGM2008.

Программа метода гравиметрической томографии позволяет рассчитывать значения высот как полного геоида (все гармоники используемой модели), так и разностного (дифференциального) геоида в определенном диапазоне глубин. Значения гармонических плотностных аномалий (в единицах г/см^3) рассчитываются для глубин верхней оболочки возмущающих слоев Земли. В работе использованы сферические коэффициенты глобальной геопотенциальной модели геоида EGM2008 до гармоник 360-го и 2190-го порядков и степеней [Pavlis et al., 2008].

В работе рассматриваются широтные и меридиональные вертикальные разрезы и латеральные

срезы на картах различных глубин. Модельные построения могут быть ориентированы по любым направлениям и сечениям земной поверхности на любую глубину. Отмечается увеличение концентрации высокочастотных гармонических аномалий к поверхности Земли. Это согласуется с распределением плотности в известных референциальных моделях, а также с повышенной дифференциацией плотностных неоднородностей на глубинах верхней мантии и земной коры.

Сравнение результатов гравитационной и сейсмической томографии во многих случаях показывает совпадение. Некоторые расхождения на меньших глубинах неизбежны, так как данные характеризуют разные физические свойства возмущающих аномальных структур: гравитационный эффект и акустические свойства. Кроме того, расхождение между результатами может быть вызвано использованием различных физических характеристик вещества Земли для изучения плотности, а именно – скорости сейсмических волн и силы тяжести.

Сейсмический метод обусловлен отражающими свойствами среды и дает информацию о пограничной зоне между слоями с различной плотностью. Чем больше разница плотностей, тем интенсивнее отражение и достовернее результат (подобно границе Мохо, где плотность изменяется в диапазоне $2,67\text{--}3,32 \text{ г/см}^3$, а скорость волн – $6,8\text{--}7,4 \text{ км/с}$).

Геопотенциал, вызванный гравитационными силами, дает информацию о распределении тел (масс), которые не имеют, как правило, жестких границ в естественной геологической среде. Нам представляется, что данные гравитационного потенциала обладают большей чувствительностью в отношении плотностной неоднородности среды и дают более детальную вертикальную стратификацию.

Создание Атласа глубинного строения Антарктики по данным метода гравитационной томографии

В результате исследований в период Международного полярного года 2007-2009 гг. в рамках проекта POLENET был разработан и издан Atlas of the Antarctic deep structure with the Gravimetric Tomography.

Атлас содержит информацию об аномальных плотностных неоднородностях, рассчитанных по методу гравиметрической томографии,

с использованием глобальной геопотенциальной модели геоида EGM96. Представлены 3D изображения вертикальных разрезов и карт латеральных срезов на различных глубинах Антарктической литосферной плиты в пределах 30° ю.ш. Тектоническая структура, меж- и внутриплитовые процессы региона Антарктики показаны на картах мира и на разрезах вдоль границы Антарктической плиты по спрединговым срединно-океаническим хребтам на протяжении более 40 000 км.

В Атласе представлено восемь тематических разделов: Метод гравиметрической томографии; Взаимодействие Антарктики с другими регионами; Трансформация структур Земли на различных глубинах; Граница литосферы Антарктики; Трансантарктические вертикальные разрезы; Разрезы, секущие Западную Антарктику; Детальные структурные карты Западной Антарктики; Структурные особенности плиты Скоша.

Атлас включает 61 карту, вертикальные разрезы, некоторые пояснения и интерпретацию изображений.

Построенные в Атласе модели глубинного строения различных районов Антарктики были представлены на ряде международных конференций в Германии, США, Великобритании, Швейцарии и использованы при подготовке

совместной с другими институтами НАН Украины коллективной монографии [Бахмутов та ін., 2017]. Эта комплексная работа была удостоена Государственной премии Украины в области науки и техники в 2015 г.

В настоящее время усовершенствовано программное обеспечение технологии гравитационной томографии в части использования современной модели геоида EGM 2008, что позволяет выполнять расчеты с гармониками до 2190-го порядка и степени. Пространственное разрешение моделей при этом может быть улучшено. Приведенные в Атласе модели глубинного строения Земли являются основой для последующих исследований.

Структура Антарктического полуострова на поперечном разрезе в районе Украинской антарктической станции Академик Вернадский

На примере поперечного через Антарктический полуостров разреза в районе Украинской антарктической станции Академик Вернадский (рис. 9) выполнены расчеты и определена роль ледникового покрова в расширении шельфа полуострова. Синий цвет в районе Антарктического полуострова и его шельфа указывает на менее

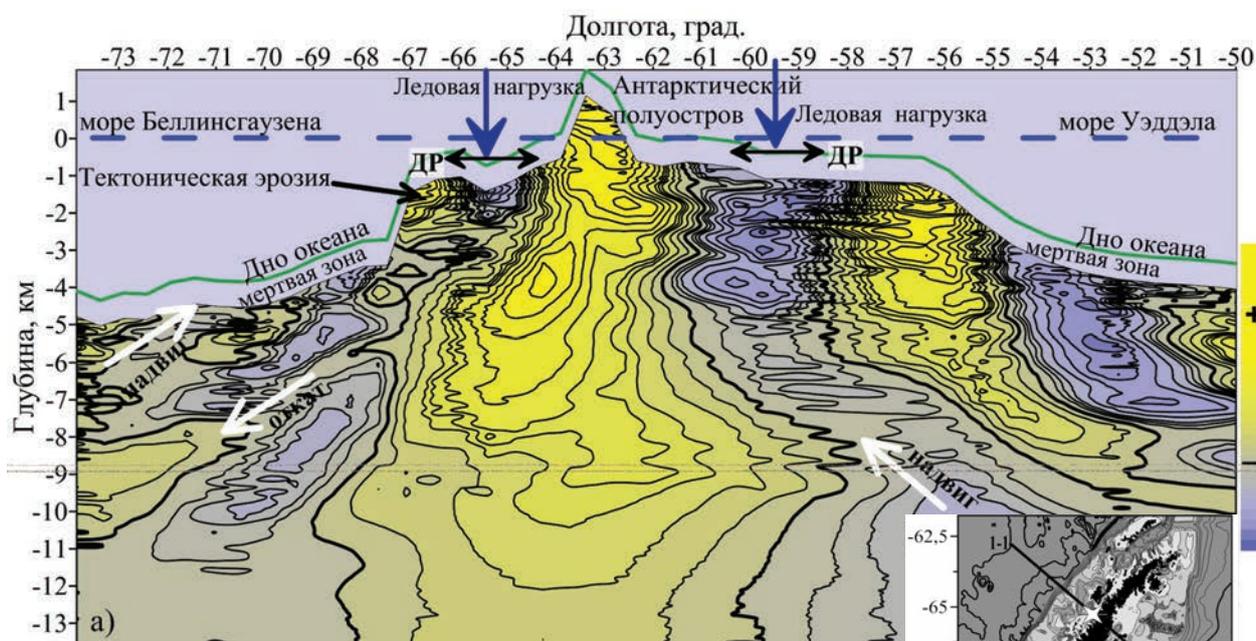


Рис. 9. Распределение плотностных неоднородностей, рассчитанных по методу гравитационного моделирования по разрезу 1-1 (а) и положение разреза 1-1 (б). Белая звездочка – положение станции Академик Вернадский

Fig. 9. The structure of the Antarctic Peninsula (а) along the cross section (б) in the area of the Vernadsky Ukrainian Antarctic Station (yellow circle)

плотные массы, желтый – более плотные. Глубины показаны от уровня моря. Мертвая зона отмечает полосу отсутствия данных в технологической схеме моделирования. Темно-синие стрелки сверху показывают действие ледовой нагрузки в период оледенения, а также девиаторное растяжение (ДР – горизонтальные стрелки). Бледно-серое покрытие на рис. 9, б – область проседания и расширения на шельфе под ледниковой нагрузкой.

Напряжения девиаторного типа определяются в геодинамике как горизонтальное сжатие (компрессионное напряжение, положительное) или растяжение (тенсильное напряжение, негативное). Рост шельфового ледника приводит к увеличению литостатической (или геостатической) напряженности земной коры, обусловленной весом ледовой нагрузки. Литостатическое давление увеличивается с глубиной и имеет не только вертикальную, но и горизонтальную составляющие. Последняя, в свою очередь, включает компоненту дифференциальных или девиаторных напряжений, которые отвечают за смещение и разрыв пород. Эти тенсильные негативные горизонтальные напряжения характеризуют растяжения пород и соответствующий тектонический сдвиг блоков под воздействием нагрузки шельфового ледника, который образовался 17-20 млн лет назад в период оледенения Антарктиды после раскрытия пролива Дрейка. Этот механизм проявляется с большей интенсивностью к югу.

На глубинах около 3000 м под дном океана литостатическое давление переходит в изостатическое. Такое изотропное состояние обеспечивает условие гидростатического равновесия и отсутствие девиаторных горизонтальных напряжений на больших глубинах.

Таким образом, можно утверждать, что рельеф шельфа Антарктического полуострова формировался одновременно под влиянием тектонического и гляциологического факторов. Роль тектонического фактора определялась самой структурой, наличием разломов и проявлениями интенсивного рифтогенного вулканизма. Гляциологический фактор проявлялся не только в экзарационном преобразовании шельфа выводными ледниками, но и влиянием ледниковой нагрузки, что привело к активизации сдвигов по разломам, опусканию коренного ложа.

Строение Антарктического полуострова от ледовой поверхности до глубины 5300 км

Материковая поверхность Антарктики скрыта от непосредственных наблюдений геологов мощным ледовым покровом. Важным событием в истории исследований Антарктики стало опубликование в 2013 г. под эгидой SCAR новой базы данных BEDMAP2 [Fretwell et al., 2013]. Информация включает подробные (с пространственным разрешением 1'x1') цифровые данные о топографии видимой ледовой поверхности, подледном рельефе коренных пород и мощности ледового покрова.

Совместное представление геолого-геоморфологических и геотектонических характеристик Антарктического полуострова приведено на рис. 10 по вертикальному разрезу вдоль гребневой области горного массива. Сверху по базе данных BEDMAP2 [Fretwell et al., 2013] показаны рельеф видимой ледовой поверхности (синяя линия) и топография подледного рельефа коренных пород (черная линия).

Ниже по данным гравитационной томографии приведена модель глубинного строения полуострова. Глубины до 5300 км показаны в логарифмическом масштабе, чтобы создать более удобное восприятие глубинного строения во всем диапазоне глубин от поверхности.

Геоморфология и картирование ледовой и геологической поверхностей Антарктического полуострова

Основными составляющими экосистемы Антарктики являются материк, ледовый покров, Южный океан с морским льдом и атмосфера. Ледовый покров представляется ключевым фактором не только с точки зрения климатологии, но в большой степени он определяет топографию видимой поверхности и геолого-геофизические характеристики твердой оболочки континента. Сведения об объеме и распределении льда в Антарктике являются основополагающими для прогнозирования поведения ледовой толщи, ее вклада в повышение уровня Мирового океана и прогнозирования эволюции региона. Антарктический ландшафт является результатом взаимодействия событий климата, эрозии/аккумуляции и тектоники.

Представленные результаты являются продолжением работ, выполняемых в рамках Государственной целевой научно-технической

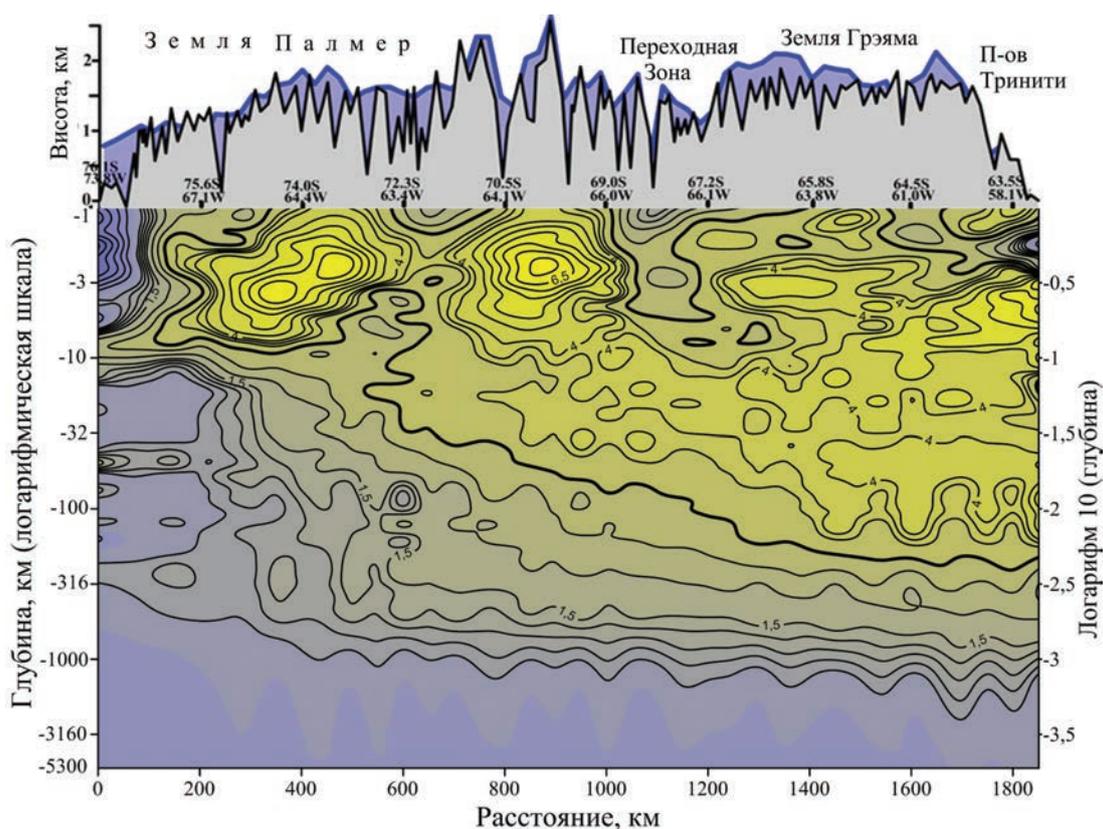


Рис. 10. Вертикальный томографический разрез распределения плотностных неоднородностей вдоль центральной части Антарктического полуострова по всей его протяженности 1850 км

Fig. 10. Geological structure of the Antarctic Peninsula from the ice surface up to the depth of 5300 km over the length of 1,850 km

программы проведения исследований в Антарктике на 2011-2020 гг. Для исследования характеристик поверхности Антарктического полуострова был выбран регион, ограниченный координатами $60,7^{\circ}$ - $76,3^{\circ}$ ю.ш. и $56,5^{\circ}$ - $77,6^{\circ}$ з.д. Анализируются три параметра: рельеф видимой ледовой поверхности, рельеф коренных геологических пород и мощность снежно-ледового покрова (рис. 11).

В качестве исходного материала были использованы данные цифровой базы BEDMAP2 на регион Антарктики южнее 60° ю.ш., характеризующие высоту видимой поверхности, высоту подледниковой поверхности и снежно-ледовую толщину. Эта база была создана по результатам международных спутниковых, аэро- и сейсмоакустических наблюдений.

Цифровая база BEDMAP2 поддерживает функции предыдущей версии BEDMAP1, но также имеет более высокое разрешение, увеличение объема данных, повышение точности. Подледная топография и топография ледового покрова имеют пространственное разрешение 1 км. Для

толщины льда создана сетка с разрешением 5 км. Однако для Антарктического полуострова, где самолетные съемки были более частые, создана сетка толщины льда в 1 км. Всего было получено 24,8 млн измерений для BEDMAP2, а для BEDMAP1 – 1,4 млн измерений.

Карты и основные морфологические характеристики ледовой и геологической поверхности Антарктического полуострова

На рис. 11 показаны карты исследуемого района, построенные по данным цифровой базы BEDMAP2: рельеф коренных пород, рельеф видимой поверхности и толщина снежно-ледового покрова. Совместный анализ этих параметров с результатами томографического моделирования глубинного строения позволяет применить подходы тектонической геоморфологии [Douglas W. Burbank, Robert S. Anderson, 2012] о взаимодействии геодинамических и геоморфологических процессов, которые мы демонстрируем на картах трех параметров BEDMAP и томографических моделях.

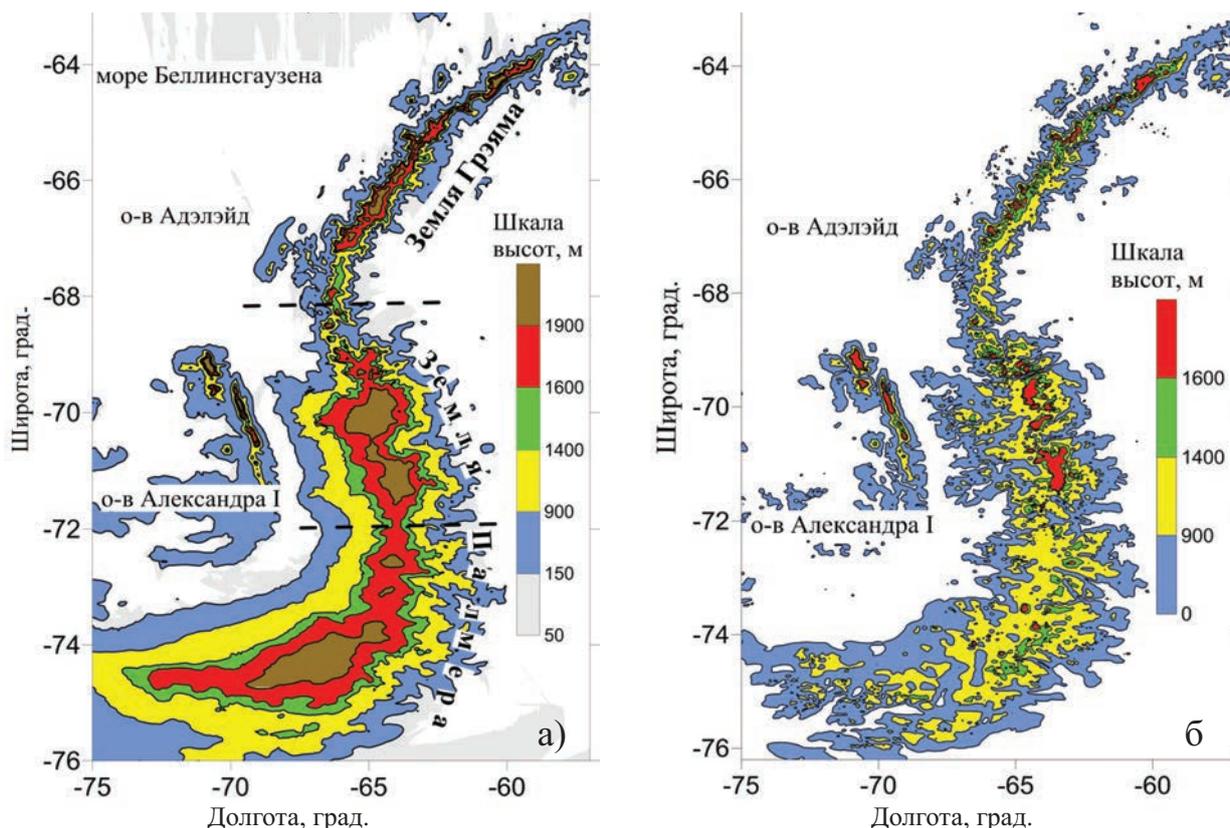
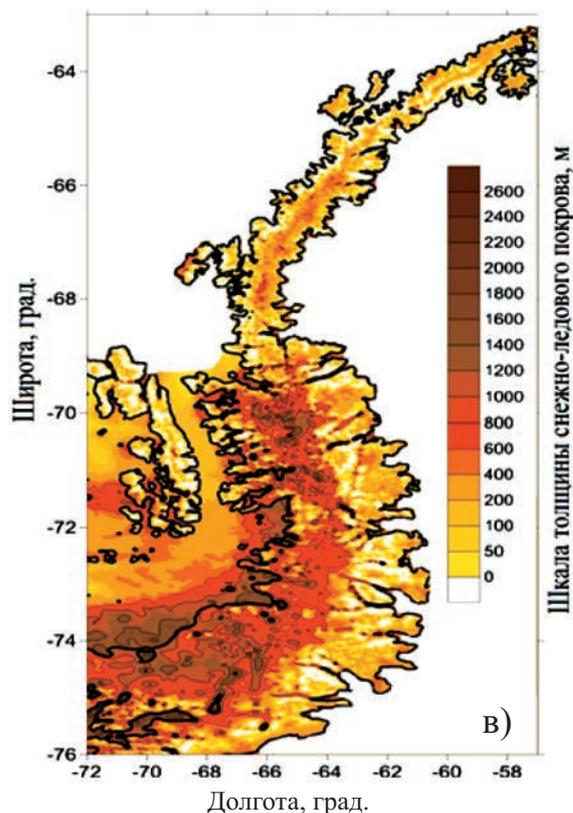


Рис. 11. Карты Антарктического полуострова, построенные по данным цифровой базы данных BEDMAP2: а – рельеф видимой поверхности; б – рельеф коренных пород; в – толщина снежно-ледового покрова. Пунктирными линиями показано положение Переходных зон

Fig. 11. Maps of the Antarctic Peninsula with the BEDMAP2 database: а – topography of the visible ice surface; б – topography of the geological layer; в – thickness of the snow and ice cover. Dashed lines are the Transitional zones position

Климатические условия Земли Грея и Земли Палмера отличаются. Климат Земли Грея теплый и влажный (средняя температура летом 1-2°, зимой -10°, осадков 35-50 см/год). Климат Земли Палмера более сухой и морозный, особенно на восточном побережье, средняя температура летом 0°, зимой -15°, осадков выпадает 10-15 см/год. Изгиб полуострова, расположение острова Александра I с запада и ледника Ларсена с востока создают особые условия для снегонакопления.

Главными блоками Антарктического полуострова являются полуостров Тринити, Земля Грея, Переходная зона и Земля Палмера. Для анализа характеристик поверхности Антарктического полуострова по самым высоким точкам горного хребта была проведена линия профиля, общая протяженность которой 2181 км. На рис. 10 показаны профили высот коренного рельефа (черная линия) и видимой поверхности льда (синяя линия) вдоль линии горного хребта, область синего цвета между линиями профилей – мощность снежно-ледового покрова.



Общая протяженность Земли Грея – 840 км, она состоит из полуострова Тринити и нескольких плато (Дитройт, Форбидден, Брюс и Эвери). Горный массив Земли Грея более узкий, в среднем 60 км в поперечнике. Средняя высота коренного рельефа 1500 м, самая высокая (видимая) точка 2328 м. Долины между вершинами хребта, по сравнению с Землей Палмера, значительно более узкие (2-25 км) и не глубокие (50-300 м). Фьорды и заливы глубоко врезаются в берега, мощность снежно-ледового слоя не превышает 600 м на обоих склонах.

Полуостров Тринити имеет протяженность 140 км. На этом отрезке высота от уровня моря по горному хребту изменяется до 1600 м. Ширина полуострова Тринити – от 22 до 48 км. На профиле видны отдельные вершины высотой 600, 1100 и 1600 м. Снежно-ледниковый покров достигает 400 м.

Вторая часть Земли Грея, в состав которой входят плато Детройт, Форбидден, Брюс и Эвери, вдоль линии горного хребта имеет протяженность 700 км. Вершины коренного рельефа достигают 1800-1900 м. Рельеф подледной поверхности неровный, а плато существуют благодаря ледовым шапкам мощностью до 500 м. Границу плато оконтуривает изолиния 1800 м. Высота видимой поверхности достигает уровня 2100 м.

Протяженность горного массива Земли Палмера – 1300 км. Ширина Земли Палмера в границах нулевой изобаты над уровнем моря составляет от 100 до 300 км. На Земле Палмера толщина снежно-ледовой шапки на западном и восточном склонах различается значительно и достигает более 700 м.

На профиле рис. 11 пунктирной линией показано положение еще одной Переходной зоны в пределах Земли Палмера, которая имеет протяженность 100 км и расположена в диапазоне широт 71,4°-72,4°. Поверхностные признаки Переходной зоны можно увидеть на карте коренного рельефа, а подтверждение и причины ее существования видны на томографическом разрезе распределения плотностных неоднородностей (рис. 10). Переходная зона разделяет два блока: первый (севернее) на уровне о-ва Александра I (69,5°-71,4° ю.ш.), второй блок – это южная окраина полуострова, которая граничит с Землей Элсуэрта. К северному горному

массиву протяженностью 400 км относятся плато Дайер (горы Уэлч), горные массивы с вершинами Надежды и Джексон высотой 2200-2600 м. Толщина снежно-ледового покрова достигает 1200 и 1600 м и оконтуривает уровень плато.

Далее, в юго-западном направлении на 800 км протянулась часть гор Антарктического полуострова, где сходятся ледовые массы шельфовых ледников Ронне и Георга VI. Поэтому мощность ледового покрова здесь наибольшая – до 1400 м. Самая высокая точка в этом районе – гора Коман (3800 м).

Батиметрические исследования

Важными результатами ученых ИГН НАН Украины в Антарктике являются проводимые при поддержке Национального антарктического научного центра Украины морские исследования в суровых условиях Западной Антарктики. В течение многих десятилетий мелководные архипелаги западного шельфа Антарктики остаются «белыми пятнами» на современных картах. Морские работы включают как отбор геологических образцов морского дна, так и проведение детальных съемок рельефа дна для создания подробных карт исследуемого района, необходимых как для научных целей, так и для безопасности мореплавания.

Научным комитетом по Антарктическим исследованиям SCAR эти результаты были представлены в программу создания **Международной батиметрической карты Южного океана (IBCSO)**, главным исполнителем которой является Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (AWI, Германия). Состав Редакторской группы включает 16 представителей из 15 стран, среди которых Украина (представитель ИГН НАН Украины Р.Х. Греку).

В перечне организаций, которые внесли вклад в создание карты, указано 34 организации, в том числе ИГН НАН Украины. Карта IBSCO одобрена Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО (ИОС, Париж), Международной гидрографической организацией (ИНО, Монако) и Научным комитетом по Антарктическим исследованиям (SCAR, Тасмания).

Многофазная химия летучих следовых соединений в Антарктике

Антарктика традиционно играет основную роль при обсуждении глобальных изменений окружающей среды. Ключевыми проблемами атмосферы в Антарктике являются разрушение озонового слоя, перенос на дальние расстояния загрязнителей воздуха и потепление, связанное с глобальными изменениями климата. Эти проблемы обусловлены, главным образом, антропогенной активностью в других регионах планеты.

До сих пор считалось, что основная биохимическая роль снежного и ледового покровов заключается в замедлении обмена соединений между более активными поверхностями океана и суши с атмосферой. Однако в последние годы стало очевидным, что многие важные процессы быстрого обмена для химических соединений происходят между поверхностью снега и атмосферой. Поэтому химические реакции в снежном покрове Антарктики могут влиять на состав ее атмосферного пограничного слоя.

Биохимические реакции ледовых микроводорослей, фотолиз и окислительно-восстановительные реакции растворенного органического вещества, образующегося из этих водорослей и фитопланктона, могут приводить к образованию и эмиссии различных летучих кислород-, серо- и галогенсодержащих соединений, неметановых углеводородов и других веществ из верхних слоев снежного покрова. В настоящее время такие реакции должны быть заметными источниками, влияющими на химию тропосферы при ускорении таяния ледников и откола айсбергов в прибрежной Антарктике.

Блоки льда (15-25 л) отобраны нами вдоль вертикального профиля деградирующего в настоящее время ледника на о-ве Галиндез, Западная прибрежная Антарктика (станция Академик Вернадский, бывшая станция Фарадей) из горизонтальных шурфов 13 уровней на глубине 1-2 м от внешней стенки.

Датировка этих блоков льда из верхних уровней ледника выполнена с помощью анализа осадочного изотопа ^{210}Pb , тогда как возраст воздуха в блоках из нижних уровней определен анализом ^{14}C в окклюдированном CO_2 . Возраст этих блоков вдоль профиля ледника варьирует от 12 до 4200 лет.

В верхних образцах льда нами впервые методом ГХ-МС идентифицировано более 200 органических соединений. Среди них присутствуют 13 фреонов и их заменителей, 46 галогенорганических соединений из возможных природных источников (17 соединений совпадают с эмитируемыми из Южного океана фитопланктоном, макроводорослями и ледовыми микроводорослями), 13 летучих серо- и селенсодержащих соединений, 27 ациклических и циклических алканов, 35 ациклических и циклических алкенов, 6 алкинов, 19 ароматических углеводородов, 5 карбоновых кислот, 28 альдегидов и кетонов, 13 спиртов, фенолов, простых и сложных эфиров и 25 гетероциклических соединений.

Для последующего количественного анализа проб льда из разных уровней ледника были выбраны следующие летучие соединения: парниковые (CO_2 и N_2O), серосодержащие газы (COS , CS_2 , CH_3SCH_3 , CH_3SSCH_3), пропилен и галогенуглеводороды природного происхождения (CF_4 , CH_3Cl , $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$, $\text{CH}_2=\text{CHCl}$, CH_3Br , CH_2Br_2 , CHBr_3 , CH_3I , $\text{CH}_2=\text{CHI}$ и $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$), природного и, возможно, антропогенного происхождения (CHCl_3 , CH_2Cl_2 , CCl_4 , CH_3CCl_3 и $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$), фреоны и их заменители (CF_2Cl_2 (CFC-12), CFCl_3 (CFC-11), $\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$ (CFC-113), $\text{CClF}_2\text{CClF}_2$ (CFC-114) и HCFC_2 (HCFC-22)).

Все эти вещества идентифицированы в верхней пробе льда; они, за исключением CF_4 , $\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$ и $\text{CClF}_2\text{CClF}_2$, имеют высокие отношения смешения по сравнению с их содержанием в современном воздухе (от 2,5 до 8000). Содержание фреонов и их заменителей (CFC-11, 12, 113, 114, HCFC-22) минимально в слоях древнего льда, что подтверждает их антропогенное происхождение в атмосфере Антарктики.

Даже после поправки на растворимость в тающей воде (CO_2 как стандарт) содержание остальных веществ находится в избытке по сравнению с их уровнем в атмосфере. Из соотношений между содержанием веществ в блоках льда и их изменениями во времени следует, что серо- и галогенсодержащие соединения образуются в присутствии ионов галогенов из трех основных источников:

– биохимические реакции ледовых микроводорослей, осадочных на снежный покров ледника;

– фотолиз растворенного в снегу органического вещества, образующегося из этих водорос-

лей и органических аэрозолей, перенесенных из верхнего слоя океана;

– гетерогенное одноэлектронное окисление этого органического вещества ионами тяжелых металлов (Cu^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{4+}) в снегу.

Определены вклады компонентов снежного покрова в распределение этих примесей, влияние температуры и диагенеза покрова на адсорбцию и растворение примесей и на скорость их диффузионного потока в покрове.

Таким образом, снеговой покров и ледники прибрежной Антарктики могут быть значительным источником летучих серо- и галогенсодержащих соединений в полярной нижней тропосфере. Исходя из отношений смешения соединений в леднике, была оценена их вторичная эмиссия в атмосферу при таянии ледников и откалывании айсбергов в прибрежной Антарктике (в тоннах за год): CH_3Cl (45), $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{Cl}$ (4), $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ (22), CH_2Br_2 (2,5), CH_3Br (1,5), CHBr_3 (24), CH_3I (4), $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{I}$ (17), COS (750) и CS_2 (40).

Хотя эти потоки составляют не более 1% от потоков из океанов, они, несомненно, локально влияют на химический состав пограничного слоя атмосферы и образование облаков над Антарктикой [Bazylevska, Bogillo, 2003; Bogillo et al., 2004; Гожик и др., 2003].

Транспорт, распределение и сток стойких органических загрязнителей в окружающей среде Антарктики

Установлены пространственные, сезонные и временные тренды таких стойких органических загрязнителей (СОЗ), как хлорсодержащие пестициды, полихлордифенилы, полихлордибензодиоксины/фураны в абиотических компонентах среды Антарктики. Найденные температурные зависимости абсолютных концентраций загрязнителей вкладов их индивидуальных конгенов согласуются с предложенными ранее гипотезами «холодной конденсации» и «глобального фракционирования» этих конгенов при транспорте в Антарктику. Установленные полупериоды исчезновения загрязнителей в воздухе, морской воде, снежном покрове и морском льду близки и отражают глобальное снижение в их использовании и эмиссии в Южном полушарии.

Определены направления и интенсивности потоков загрязнителей из воздуха в морскую воду, снежный покров и почвы, а также из воды

в донные отложения прибрежной зоны Антарктики. Показано, что конечными ловушками загрязнителей могут быть глубинные воды морей Уиделла и Росса, ледовый покров, почвы и донные отложения прибрежной зоны Антарктики; оценена емкость этих ловушек.

Показано, что таяние ледников и айсбергов в результате глобального потепления в прибрежной зоне Антарктики может быть существенным локальным источником вторичной эмиссии стойких хлорорганических загрязнителей в прибрежные воды океана, озер и в атмосферу Антарктики. Так как из данных лазерной спутниковой альтиметрии за период 1992–2017 гг. следует, что скорость таяния ледового покрова Антарктиды за последние 5 лет возросла втрое по сравнению с предыдущим периодом, то были оценены максимально возможные ежегодные потоки вторичной эмиссии этих СОЗ в окружающую среду Антарктиды в периоды 1992–2012 гг. и 2012–2017 гг., а также суммарная их эмиссия за период 1992–2017 гг. Полученные оценки указывают на возможное существенное возрастание СОЗ в биоте Антарктики вследствие их биоаккумуляции и биомагнификации в пищевых цепях [Bogillo, Bazylevska, 2008; Ткаченко, Богилло, 2005].

Стационарная кинетика гетерогенного стока летучих примесей из атмосферы Антарктики

Атмосферные аэрозоли постоянно участвуют в различных гетерогенных химических реакциях с газофазными соединениями. Взаимодействие летучих примесей с частицами льда, сажи, минеральной пыли, морских солей и органических аэрозолей может влиять на газофазную химию атмосферы Антарктики, ее фотохимию, а также изменять химический состав самих частиц. Поэтому для описания скорости и механизма таких процессов необходимы кинетические модели. Развита представления гетерогенной химии атмосферы, включающие модели адсорбционного равновесия, кинетики хемосорбции, десорбции, бимолекулярных фотореакций летучих примесей на неоднородной поверхности твердых частиц, методы решения обратных задач и закономерности влияния природы компонентов аэрозолей и молекул летучих примесей на термодинамику адсорбции и кинетику превращений с их участием.

При использовании кинетической модели «сопротивлений» установлено, что отношение скоростей бимолекулярных реакций летучей примеси X с нелетучей примесью Y на поверхности и в объеме жидких частиц значительно возрастает при снижении размера частиц, растворимости и коэффициента диффузии X в жидкости, увеличении прочности адсорбционного комплекса X с поверхностью и сегрегации Y из объема к поверхности частиц.

Установлено, что морфология субстратов аэрозолей значительно влияет на определяемые в лаборатории их вероятности взаимодействия с летучими примесями. Предложены способы расчета этих параметров с учетом параметров морфологии субстратов и физико-химических параметров молекул примесей. Так как большинство твердых аэрозолей представляет собой агрегаты наночастиц либо нанопористые частицы, то используемое для расчета площади их поверхности приближение сферичности частиц приводит к существенному снижению константы скорости гетерогенного удаления примеси, и более корректным является использование площади поверхности частиц по уравнению БЭТ (метод определения удельной адсорбционной площади поверхности твердых тел) и вероятности взаимодействия, нормированной на эту площадь.

Полученное соотношение между вероятностью взаимодействия примеси в нанопорах частиц и размером этих пор указывает на возможность ускорения реакции, протекающей по механизму Лэнгмюра-Хиншельвуда, вследствие взаимодействия примеси со стенками пор. Показано, что вариации химического состава минеральных аэрозолей по размеру их частиц могут значительно влиять на скорость гетерогенного стока летучих примесей из атмосферы. Наиболее сильно такие эффекты проявляются при увеличении доли частиц тонкой моды и высокой вероятности взаимодействия примесей с поверхностью частиц.

Установлено, что логарифм вероятности взаимодействия летучих примесей различной природы с компонентами поверхности атмосферных аэрозолей линейно возрастает при увеличении индекса глобальной электрофильности примесей и снижении этого индекса, рассчитанного для компонентов поверхности, что может быть связано с влиянием этого индекса на внутренний барьер превращений.

Найдены соотношения «структура – активность» между кинетическими параметрами реакций летучих примесей с поверхностью компонентов минеральных аэрозолей и «химическим» индексом аэрозолей, рассчитываемым на основании их изоэлектрических точек, потенциалов нулевого заряда, относительной основности поверхности из данных обращенной газовой хроматографии и теоретических кислотно-основных дескрипторов оксидов металлов. Высокие угловые коэффициенты этих соотношений указывают на существенное влияние химического состава аэрозолей на скорость гетерогенного стока примесей из атмосферы.

Показано, что адсорбционная и реакционная способность химически однородной поверхности сферических атмосферных наночастиц снижается при уменьшении их диаметра. Так как при уменьшении размера частиц происходит экспоненциальное возрастание концентрации дефектов поверхности наночастиц, то экспериментально наблюдаемое возрастание адсорбционной и реакционной способности наночастиц при снижении их размера объясняется увеличением неоднородности их поверхности. Выводы теории подтверждены численными расчетами и экспериментальными данными по адсорбции органических и неорганических молекул и ионов на поверхности наночастиц оксидов Ti и Fe в водных растворах [Bogillo et al., 2010; Богилло, 2011].

Влияние фактора электризации снега/льда в полярных условиях

Исследования последних лет показали, что на атмосферу полярных регионов и на климат планеты в целом существенно влияют многие химические реакции, протекающие в снежном покрове и на границе раздела фаз снег/воздух. Толчком для начала исследований в этом направлении стало открытие в 2000 г. в тропосфере Южного полюса неожиданно высоких концентраций радикалов и продуктов радикальных реакций, которые оказались на 1-2 порядка выше ожидаемых значений, рассчитанных по газозависимым моделям. Стало ясно, что эти различия являются результатом воздействия химических реакций, происходящих в поверхностном слое снега. Собранный на данный момент большой фактический материал все более свидетельствует в пользу того, что

снежный покров – это своеобразный химический реактор, но вопрос о протекающих там реакциях и об их механизмах продолжает находиться в стадии изучения и обсуждения. По сей день основной движущей силой наблюдаемых химических превращений считается фотохимический механизм. Тем не менее, многие из полученных за последние годы данных не могут быть интерпретированы только в рамках фотохимической модели. До сих пор продолжается поиск иных возможных факторов, которые существенно могут влиять на ход химических реакций на поверхности снежного покрова. Наши исследования посвящены изучению возможности влияния фактора электризации снега/льда в полярных условиях.

Несмотря на общеизвестность факта высокой электризации льда/снега в условиях полярных регионов и внимания к этому вопросу специалистов по физике льда и метеорологов, при анализе химических процессов, происходящих на поверхности снега, электрические явления до сих пор не учитывали. Увеличение заряда снежных частиц может происходить в результате их электризации трением (трибоэлектризации) под действием механической работы ветра. При этом электрическое поле увеличивается на порядки, причем максимальное концентрирование электрического поля следует ожидать на остриях заземленных объектов. Кроме того, флуктуация электрического поля во время магнитосферных бурь и суббурь и особые локальные температурные условия, способствующие возникновению поверхностного тумана над молодым льдом и росту «ледяных цветов», согласно проведенным оценкам, также могут приводить к возникновению коронного разряда на концах растущих ледяных игл.

Гипотеза, предложенная Е.Ю. Ткаченко, позволяет объяснить механизм эмиссии бромсодержащих соединений из конденсированной фазы в газообразную в процессе весенних циклов разрушения поверхностного озона (ozone depletion events – ODE) в морской зоне полярных регионов. Е.Ю. Ткаченко предположила, что «запуск» процесса ODE определяется именно тем, что в результате суммарного воздействия различных природных факторов на остриях ледяных кристаллов возникают высокие градиенты электрического поля, которые после достижения порогового значения приво-

дят к возникновению коронирования, протеканию редокс-реакций, генерируя локально высокие концентрации активных частиц окислителей, запускающих ODE. Такой подход позволяет непротиворечиво объяснить многообразие погодных условий, в которых ODE наблюдались различными исследователями, возможность участия разнообразных субстратов, плохую воспроизводимость полевых наблюдений и др.

Во время ветра, согласно проведенным оценкам, могут возникать условия для преодоления порога Релея, после чего начинается разбрызгивание заряженных наночастиц – аэрозолей. Заряженные частицы аэрозоля могут также спровоцировать образование активных частиц и инициирование ODE. Предполагается, что также возможна эмиссия иона галогена аналогично процессам электроспрей ионизации в масс-спектропии.

Предложенные Е.Ю. Ткаченко соображения о роли электрических явлений в объяснении химических процессов в снежном покрове в условиях Антарктиды были вынесены на обсуждение специалистов и вызвали большой интерес. Первая часть гипотезы о влиянии ветра на протекание химических реакций в снежном покрове была опубликована в австралийском журнале (Imp. factor 2.9) [Tkachenko, Kozachkov, 2012]. Ей предшествовала редакторская статья «Парадоксы химии снега» [Francesconi, 2012], и на страницах журнала Environmental Chemistry развернулась оживленная дискуссия [Van Dam, Helmig, 2012; Bartels-Rausch, Schneebeli, 2012]. Вторая статья, с более обобщенным изложением гипотезы, была опубликована в 2017 г. в журнале Atmospheric Research (Imp. factor 3.78). Доклад с изложением гипотезы был перед этим представлен на симпозиуме Arctic Summit в Праге в 2017 г. [Tkachenko, 2019], где вызвал интерес специалистов, в том числе одного из основателей направления Lars Kaleschke. В 2018 г. по приглашению профессора Hans-Werner Jacobi Е.Ю. Ткаченко провела семинар в Institute for Geosciences and Environmental research (бывший Институт гляциологии), г. Гренобль, изложив новые подходы к объяснению с новых позиций химических превращений в полярных регионах. Французские коллеги заинтересованно встретили новые идеи, однако сложность полевых экспериментов с учетом многочисленных

факторов, влияющих на результаты исследований, до сих пор не позволила нескольким исследователям, в частности Datlev Helmig и Joel Savarino, пытавшимся в полевых условиях изучить влияние ветра на концентрацию озона и NO_x, окончательно подтвердить/опровергнуть предложенные соображения. Дискуссия с западными коллегами относительно роли процессов электризации на протекание химических превращений в снежном покрове продолжается.

Заключение

Основными результатами проведенных исследований является создание новых технологий, обеспечивающих получение детальной обновляемой информации для районов Украины и Антарктики. Анализ спутниковых данных и обзор зарубежного опыта показывает их высокую информативность для получения практических оценок экологического состояния и прогноза явлений деформации поверхности и оползней в экологически напряженных районах Украины. Все это согласуется с нормативными документами Украины и соответствующих органов по управлению и надзору за состоянием безопасности жизнедеятельности.

Список литературы

Бахмутов В.Г., Третьяк К.Р., Максимчук В.Ю., Глотов В.М., Греку Р.Х., Єгорова Т.П., Залізівський А.В., Колосков О.В., Корчагин І.М., Проненко В.О. Структура і динаміка геофізичних полів у Західній Антарктиці. Львів: Вид-во «Львівська політехніка», 2017. 336 с.

Богилло В.И. Влияние фазового состава атмосферных аэрозолей на кинетику их взаимодействия с летучими примесями. *Химия, физика и технология поверхности*. 2011. Т. 2, № 1. С. 61-75.

Гожик П.Ф., Богилло В.И., Базилевская М.С. Природные источники атмосферных галогенуглеводородов. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 1. С. 44-53.

Гончар В.В., Трезубенко В.И., Токовенко В.С. Режимы деформирования и взаимодействие Черноморско-Крымской области конвергенции. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2007. № 2. С. 5-18.

Мориц Г. Фигура Земли. Теоретическая геодезия и внутреннее строение Земли. Киев, 1994. 240 с. ISBN 5-7702-0748-5.

Ткаченко Е.Ю., Богилло В.И. Стойкие органические загрязнители в экосистеме Антарктики. *Еко-*

Важная роль новых технологий по определению глубинного строения территорий относится к проблемам расширения и уточнения природных ресурсов. Наш опыт выявления перспективных на углеводороды площадей позволяет с высокой эффективностью без предварительных дорогостоящих наземных или морских исследований выявлять такие участки.

Современные спутниковые методы обеспечивают эффективный геодинимический мониторинг малых и медленных смещений поверхности и крупноблочных сооружений. Важной проблемой при этом остается выявление причин геотектонического происхождения, скрытых в близповерхностных (оползни и шахты, например) и глубинных слоях геосферы, которые приводят, порой, к катастрофическим последствиям.

Для этого используются радиолокационные спутники последнего поколения для измерения малых (миллиметры-сантиметры) и медленных (от суток до месяцев) вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности (оползни, землетрясения на ранней стадии, шахтные разработки) и крупноблочных сооружений (блоки АЭС, огородительные дамбы, берегоукрепления).

логія довкілля та безпека життєдіяльності. 2005. № 4. С. 29-45.

Bartels-Rausch T., Schneebeli M. Opinion essay, Interactive discussion (Concept article: Possible contribution of triboelectricity to snow-air interactions by Tkachenko and Kozachkov). *Env. Chemistry*. 2012. 9 (2). P. 119-120. doi: 10.1071/EN10074) EN11147.

Bazylevska M.S., Bogillo V.I. Description of air/surface partitioning for volatile organic pollutants in Antarctic environment. *Role of Interfaces in Environmental Protection*. (Ed. S. Barany). Amsterdam: Kluwer Acad. Publ., 2003. P. 153-160.

Bogillo V.I., Bazylevska M.S. Partitioning and exchange of organochlorine contaminants between abiotic compartments in Antarctica. *The Fate of Persistent Organic Pollutants in the Environment*. (Ed. E. Mehmetli, B. Koumanova). Dordrecht: Springer, 2008. P. 333-351.

Bogillo V.I., Bazylevska M.S., Mischanchuk B.G., Pokrovskiy V.A. Partitioning of volatile halocarbons between surrogates for atmospheric solid aerosols and gas phase as examined by TPD MS and inverse gas chromatography. *Chemistry, physics and technology of surface*. 2010. Vol. 1, № 4. P. 401-414.

Bogillo V.I., Borchers R., Bazylevska M.S. Formation and sinks of volatile trace compounds in Coastal Antarctica. *Terra Nostra*. 2004. No. 4. P. 109-110.

Douglas W. Burbank, Robert S. Anderson. Tectonic geomorphology. 2012. ISBN 978-1-4443-3886-7.

Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonnet D. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. *ESA Publications*. 2007. TM-19. ISBN 92-9092-233-8.

Francesconi K.A. Radical views on snow chemistry. *Env. Chemistry*. 2012. 9 (2). doi: 10.1071/ENv9n2_ED.

Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamberg J.L. et al. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*. 2013. № 7. P. 375–393.

Majdański M., Kozlovskaya E., Świeczak M., Grad M. Interpretation of geoid anomalies in the contact zone between the East European Craton and the Palaeozoic Platform – I. Estimation of effects of density inhomogeneities in the crust on geoid undulations. *Geophys. J. Int.* 2009. № 177. P. 334–346.

Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.

References

Bakmutov V.G., Tretyak K.P., Maksymchuk V.Yu., Glotov V.M., Greku R.H., Egorova T.P., Zalizovsky A.V., Koloskov O.V., Korchagin I. M., Pronenko V.O. (2017). Structure and dynamics of geophysical fields in the Western Antarctica. Lviv: Vydavnytstvo «Lvivska Politehnika», 336 p. (in Ukrainian).

Bartels-Rausch T., Schneebeli M. (2012). Opinion essay, Interactive discussion (Concept article: Possible contribution of triboelectricity to snow-air interactions by Tkachenko and Kozachkov. *Env. Chemistry*, 9 (2), p. 119-120. doi: 10.1071/EN10074) EN11147 (in English).

Bazylevska M.S., Bogillo V.I. (2003). Description of air/surface partitioning for volatile organic pollutants in Antarctic environment. *Role of Interfaces in Environmental Protection*. (Ed. S. Barany). Amsterdam: Kluwer Acad. Publ., p. 153-160 (in English).

Bogillo V.I. (2011). Influence of phase composition of atmospheric aerosols on the interaction kinetics with volatile impurities. *Khimiya, fizika i tekhnologiya poverkhnosti (Chemistry, physics and technology of surface)*, vol. 2, No 1, p. 61-75 (in Russian).

Bogillo V.I., Bazylevska M.S. (2008). Partitioning and exchange of organochlorine contaminants between abiotic compartments in Antarctica. *The Fate of Persistent Organic Pollutants in the Environment*. (Ed. E. Mehmetli, B. Koumanova). Dordrecht: Springer, p. 333-351 (in English).

The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO) Version 1.0—A new bathymetric compilation covering circum-Antarctic waters. Jan Erik Arndt, Hans Werner Schenke, Martin Jakobsson, Frank O. Nitsche, Gwen Buys, Bruce Goleby, Michele Rebecco, Fernando Bohoyo, Jongkuk Hong, Jenny Black, Rudolf Greku, Gleb Udintsev, Felipe Barrios, Walter Reynoso-Peralta, Morishita Taisei and Rochelle Wigley. *Geophysical Research Letters*. 28 June 2013. Vol. 40, iss. 12. P. 3111–3117.

Tkachenko E. Possible role of electric forces in bromine activation during polar boundary layer ozone depletion and aerosol formation events. *Atmospheric research*. 2017. Vol. 196. P. 1-7.

Tkachenko E.Y., Kozachkov S.G. Possible contribution of triboelectricity to snow-air interactions. *Env. Chemistry*. 2012. 9 (2). P. 109-115. doi: 10.1071/EN10074.

Turcotte, D.L., Schubert G. Geodynamics. Cambridge University Press. 2002. 456 p. ISBN 0 521 66624 4.

Van Dam B., Helmig D. Opinion essay, Interactive discussion (Concept article: Possible contribution of triboelectricity to snow-air interactions by Tkachenko and Kozachkov). *Env. Chemistry*. 2012. 9 (2). P. 116-118. doi: 10.1071/EN10074) EN11151.

Bogillo V.I., Bazylevska M.S., Mischanchuk B.G., Pokrovskiy V.A. (2010). Partitioning of volatile halocarbons between surrogates for atmospheric solid aerosols and gas phase as examined by TPD MS and inverse gas chromatography. *Chemistry, physics and technology of surface*, vol. 1, № 4, p. 401-414 (in English).

Bogillo V.I., Borchers R., Bazylevska M.S. (2004). Formation and sinks of volatile trace compounds in Coastal Antarctica. *Terra Nostra*, No. 4, p. 109-110 (in English).

Douglas W. Burbank, Robert S. Anderson. (2012). Tectonic geomorphology. ISBN 978-1-4443-3886-7 (in English).

Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonnet D. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. *ESA Publications*, TM-19, ISBN 92-9092-233-8 (in English).

Francesconi K.A. (2012). Radical views on snow chemistry. *Env. Chemistry*, 9 (2). doi: 10.1071/ENv9n2_ED (in English).

Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamberg J.L. et al. (2013). Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, № 7, p. 375–393 (in English).

Gonchar V.V., Tregubenko V.I., Tokovenko V.S. (2007). Deformation modes and interaction of the

convergence Black Sea-Crimean region. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, № 2, p. 5-18 (in Russian).

Gozhik P.F., Bogillo V.I., Bazylevska M.S. (2003). Natural sources of the atmospheric halocarbons. *Ekologiya dovkillya ta bezpeka zhyttediyalnosti*, No 1, p. 44-53 (in Russian).

Majdański M., Kozlovskaya E., Świeczak M., Grad M. (2009). Interpretation of geoid anomalies in the contact zone between the East European Craton and the Palaeozoic Platform – I. Estimation of effects of density inhomogeneities in the crust on geoid undulations. *Geophys. J. Int.*, № 177, p. 334–346 (in English).

Moritz H. (1994). The Figure of the Earth. Theoretical Geodesy and the Earth's Interior. Kiev, 240 p. ISBN 5-7702-0748-5 (in Russian).

Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. (2008). An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, presented at the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008 (in English).

The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean (IBCSO) Version 1.0—A new bathymetric compilation covering circum-Antarctic waters. Jan Erik Arndt, Hans Werner Schenke, Martin Jakobsson, Frank O. Nitsche, Gwen Buys, Bruce Goleby, Michele Rebesco, Fernando Bohoyo, Jongkuk Hong, Jenny

Black, Rudolf Greku, Gleb Udintsev, Felipe Barrios, Walter Reynoso-Peralta, Morishita Taisei and Rochelle Wigley. *Geophysical Research Letters*, 28 June 2013, vol. 40, iss. 12, p. 3111–3117 (in English).

Tkachenko E. (2017). Possible role of electric forces in bromine activation during polar boundary layer ozone depletion and aerosol formation events. *Atmospheric research*, vol. 196, p. 1-7 (in English).

Tkachenko E. Yu., Bogillo V.I. (2005). Persistent organic pollutions in the Antarctic ecosystems. *Ekologiya dovkillya ta bezpeka zhyttediyalnosti*, No 4, p. 29-45 (in Russian).

Tkachenko E.Y., Kozachkov S.G. (2012). Possible contribution of triboelectricity to snow–air interactions. *Env. Chemistry*, 9 (2), p. 109-115. doi: 10.1071/EN10074 (in English).

Turcotte, D.L., Schubert G. (2002). Geodynamics. Cambridge University Press., 456 p. ISBN 0 521 66624 4 (in English).

Van Dam B., Helmig D. (2012). Opinion essay, Interactive discussion (Concept article: Possible contribution of triboelectricity to snow-air interactions by Tkachenko and Kozachkov. *Env. Chemistry*, 9 (2), p. 116-118. doi: 10.1071/EN10074) EN11151 (in English).

Статья поступила
12.02.2019