УДК 550.38435:551.71 (470.22)

# СОЗДАНИЕ УЧЕБНОГО ПОЛИГОНА ПО КОМПЛЕКСНОМУ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОМУ ИЗУЧЕНИЮ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ПРЕДЕЛАХ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА (МЫС ФИОЛЕНТ, ГЕРАКЛЕЙСКОЕ ПЛАТО)

**Олег Владимирович Крылов[1]✉, Наталия Валерьевна Лубнина[2], Михаил Львович Владов[3], Игорь Николаевич Модин[4], Галина Владимировна Брянцева[5], Наталья Игоревна Косевич[6], Андрей Юрьевич Паленов[7], Алексей Денисович Скобелев[8], Александр Иванович Гущин[9], Валентин Олегович Осадчий[10], Владислав Павлович Евстигнеев[11], Александр Александрович Фадеев[12]**

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; o.crylov2010@yandex.ru
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; natalia.lubnina@gmail.com
[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vladov_ml@mail.ru
[4] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; imodin@yandex.ru
[5] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; bryan.bryan@yandex.ru
[6] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nkosevich@googlemail.com
[7] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; palenov@mail.ru
[8] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; adskobelev@yandex.ru
[9] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alexmsu-824@mail.ru
[10] Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка, Россия; 909404@gmail.com
[11] НИЛ Региональные климатические системы, СевГУ, Севастополь, Россия; evstigneev@mail.com
[12] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; allexfadeev@mail.ru

***Аннотация.*** Выполнен комплекс геолого-геофизических работ по изучению трещиноватости в юрско-неогеновых породах Гераклейского плато, включавший полевое изучение зоны Георгиевского разлома, структурно-геоморфологический анализ; геофизический комплекс объединял морские сейсмические и магнитометрические исследования в комплексе с наземными исследованиями методами электротомографии, гравиметрии и магнитометрии. Основной объект изучения — зона глубинного Георгиевского разлома и оперяющие тектонические нарушения.

В результате комплексных исследований установлены главные геолого-геофизические критерии выделения опасных участков трещиноватости: крайне неоднородное строение верхней части геоэлектрического разреза до глубины 30–40 м по данным электроразведки; сейсмические данные свидетельствуют о том, что в зонах повышенной трещиноватости миоценовые известняки имеют крайне низкие прочностные свойства; по электроразведочным данным обводненность (влажность) верхней части разреза резко меняется по горизонтали; на закарстованных территориях на определенной глубине наблюдается резкая изменчивость удельного сопротивления от максимально больших значений до минимальных. Особенно опасны трещины растяжения, которые возникают на участках положительного рельефа пород основания, по которым происходит скольжение оползневых тел, представленных известняками.

***Ключевые слова***: геодинамика, трещиноватость, мониторинг, Юго-Западный Крым, техногенные риски, комплексные геолого-геофизические исследования, электротомография, тектонофизика, структурные парагенезы, дистанционное зондирование, современная геодинамика, структурно-геоморфологический анализ

***Для цитирования***: *Крылов О.В., Лубнина Н.В., Владов М.Л., Модин И.Н., Брянцева Г.В., Косевич Н.И., Паленов А.Ю., Скобелев А.Д., Гущин А.И., Осадчий В.О., Евстигнеев В.П., Фадеев А.А.* Создание учебного полигона по комплексному геолого-геофизическому изучению трещиноватости в пределах Юго-Западного Крыма (мыс Фиолент, Гераклейское плато) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 152–166.

# CREATION OF A TRAINING SITE FOR THE COMPLEX GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDY OF FRACTURING WITHIN THE SOUTH-WESTERN CRIMEA (CAPE FIOLENT, HERACLEA PLATEAU)

**Oleg V. Krylov[1], Nataliya V. Lubnina[2], Michail L. Vladov[3], Igor N. Modin[4], Galina V. Bryantseva[5], Nataliia I. Kosevich[6], Andrey Yu. Palenov[7], Aleksey D. Skobelev[8], Alexandr I. Gushchin[9], Valentin O. Osadchiy[10], Vladislav P. Evstigneev[11], Aleksandr A. Fadeev[12]**

[1] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; o.crylov2010@yandex.ru
[2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; natalia.lubnina@gmail.com
[3] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vladov_ml@mail.ru
[4] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; imodin@yandex.ru
[5] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; bryan.bryan@yandex.ru
[6] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nkosevich@googlemail.com
[7] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; palenov@mail.ru
[8] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; adskobelev@yandex.ru
[9] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alexmsu-824@mail.ru
[10] Institute of Experimental Mineralogy of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia; 909404@gmail.com
[11] NSL Regional Climate Systems, SevSU, Sevastopol, Russia; evstigneev@mail.com
[12] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; allexfadeev@mail.ru

***Annotation.*** A complex of geological and geophysical work was carried out to study fracturing in the Jurassic-Neogene rocks of the Heraclea Plateau, which included a field study of the Georgievsky fault zone, structural and geomorphological analysis; the geophysical complex combined marine seismic and magnetometric studies in combination with ground-based studies using electrotomography, gravimetry and magnetometry. The main object of study was the zone of the deep Georgievsky fault and the feathering tectonic disturbances.

As a result of complex studies, the main geological and geophysical criteria for the identification of dangerous fracturing sites have been established: the extremely heterogeneous structure of the upper part of the geoelectric section to depths of 30–40 m according to electrical survey data; seismic data indicate that Miocene limestones have extremely low strength properties in areas of increased fracturing; according to electrical survey data, the water content (humidity) of the upper part of the section changes sharply horizontally; in the karst areas at certain depths, there is a sharp variability in resistivity from the maximum values to the minimum; fracturing develops quite actively under the influence of landslide processes. Especially dangerous are the stretching cracks that occur in areas of positive relief of the base rocks, along which landslide bodies represented by limestones slide.

***Key words***: geodynamics, fracturing, monitoring, south-western Crimea, technogenic risks, complex geological and geophysical studies, electrotomography, tectonophysics, structural parageneses, remote sensing, modern geodynamics, structural and geomorphological analysis

***For citation***: Krylov O.V., Lubnina N.V., Vladov M.L., Modin I.N., Bryantseva G.V., Kosevich N.I., Palenov A. Yu., Skobelev A.D., Gushchin A.I., Osadchiy V.O., Evstigneev V.P., Fadeev A.A. Creation of a training ground for the complex geological and geophysical study of fracturing within the south-western Crimea (Cape Fiolent, Heraclea Plateau). *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 6: 152–166. (In Russ.).

**Введение.** Успешность геодинамических и инженерно-геологических изысканий во многом зависит от правильного понимания строения и истории развития исследуемого региона. Использование одного-двух методов часто дает однобокую картину и не позволяет корректно интерпретировать результаты исследований.

Для того чтобы показать возможности и ограничения различных геолого-геофизических методов на хорошо изученном и хорошо обнаженном объекте — Гераклейском плато — были проведены геолого-геофизические и дистанционные исследования, включавшие структурно-геоморфологический, морфометрический и гидрологический анализы, а также морские сейсмические и магнитометрические исследования в комплексе с наземными методами электротомографии, гравиметрии и магнитометрии.

При выборе детальных участков и интерпретации результатов мы опирались как на глобальные реконструкции [Nikishin et al., 2015 a,b; Юдин, 2011; Yegorova et al., 2022] и ссылки в этих работах, так и на результаты детальных тектонофизических [Муровская, Шеремет, 2011] и петрологических [Шнюков и др., 2019; Промыслова и др., 2019] исследований.

В тектоническом отношении Гераклейское плато представляет собой обособленный вулканотектонический блок в шовной зоне сочленения Скифской плиты и Горного Крыма. С юго-востока он ограничен Георгиевской зоной разломов (эшелонированных тектонических нарушений), активной в позднеальпийский этап, а с северо-востока — раннекиммерийской Черноречeнской зоной разломов глубинного заложения. В его строении представлены верхний и нижний структурные этажи, слагающие Горно-Крымское сооружение.

Несмотря на хорошую обнаженность горных пород в береговых обрывах и в развитых по ослабленной зоне эрозионных оврагах Гераклейского плато, не существует единого мнения относительно времени и кинематики смещения отдельных блоков в зоне Георгиевского разлома.

**Геологический разрез мыса Фиолент.** Мыс Фиолент расположен на южной оконечности Гераклейского п-ова. Здесь в клифе обнажаются магматические породы среднеюрского (байосского) магматического комплекса, перекрытые с угловым несогласием известняковой толщей миоцена.

Геодинамическую природу магматических образований мыса Фиолент большинство исследователей рассматривают как островодужную. Считается, что они принадлежат щитовому вулкану, цоколем которого служат породы таврической серии (верхний триас–нижняя юра), однако до сих пор в районе м. Фиолент породы таврической серии не обнаружены ни на суше, ни на морском дне [Шнюкова, 2005]. Скважины, пробуренные на севере от м. Фиолент на

Гераклейском плато, также не вскрыли породы таврической серии [Шнюков и др., 2019]. Вулканические образования перекрыты органогенно-детритовыми и глинистыми известняками сарматского яруса неогена, залегающими практически горизонтально. Плагиориолиты и их брекчии, составляющие около 10% от общего количества магматических пород Гераклейского плато, развиты преимущественно на востоке от м. Фиолент, где они частично слагают скальные уступы Яшмовой бухты, экструзивные купола скал Монах, Георгиевская, а также Монастырский шток. Плагиориолитами сложены также скалы Ифигения, Орест и Пилат [Промыслова и др., 2019].

В составе миоценовых отложений м. Фиолент выделяют три комплекса. На байосских базальтах залегают рыхлые светло-желтые мелкозернистые кварцевые песчаники мощностью до 3 м. Выше залегают карбонатные породы, представленные здесь неяснослоистыми глинистыми известняками и известняковыми конгломератами, которые слагают косые серии мощностью до 12 м. Характерная особенность этого интервала разреза заключается в выраженной асимметрии распределения пород по латерали: в северо-восточной части косые серии ориентированы на юг и представлены известковыми конгломератами, а в юго-восточной части косые серии направлены на север и сложены глинисто-карбонатными породами с неравномерной карбонатизацией. Возраст косослоистых серий определен как раннечокракский [Рубцова, 2009]. Мощность этого комплекса составляет 18 м.

Верхний комплекс миоценовых отложений сложен известняками-ракушечниками параллельно- и косослоистыми, кавернозными. Мощность верхнего комплекса 3–5 м.

**Материалы и методы исследований.** ***Цифровая модель рельефа (ЦМР)*** построена по данным ALOS World 3D [ALOS…, 2019] с использованием глобального набора данных цифровой модели поверхности с горизонтальным разрешением около 30 м (1×1″) и точностью по высоте около 5 м. В дальнейшем ЦМР использована при проведении структурно-геоморфологического анализа по методу Н.П. Костенко [Костенко, 1999], а также морфометрического и структурно-геоморфологического ГИС-анализов ЦМР.

Результаты структурно-геоморфологического и морфометрического анализов рельефа того или иного региона позволяют в рамках предполевых камеральных работ выявить устойчивые связи геологического строения и рисунка современной поверхности рельефа. В результате структурно-геоморфологического и морфометрического анализа рельефа выделяют структуры двух рангов: структуры, сформированные новейшими тектоническими движениями, вулканическими и псевдовулканическими процессами, и структуры, которые возникли в результате процессов денудации и эрозии первично тектонических структур. Таким образом, по картам структурно-геоморфологического дешифрирования, картам морфометрических комплексов рельефа, картам базисных поверхностей и картам разностей базисных поверхностей можно четко наметить участки для детального геолого-геоморфологического картирования и профилирования с использованием высокоточных геофизических исследований. Подчеркнем, что методы геоморфологического картографирования в первую очередь позволяют выявить определенные особенности в строении структур до уровня базиса эрозии, который для каждого региона и даже участка исследования будет свой.

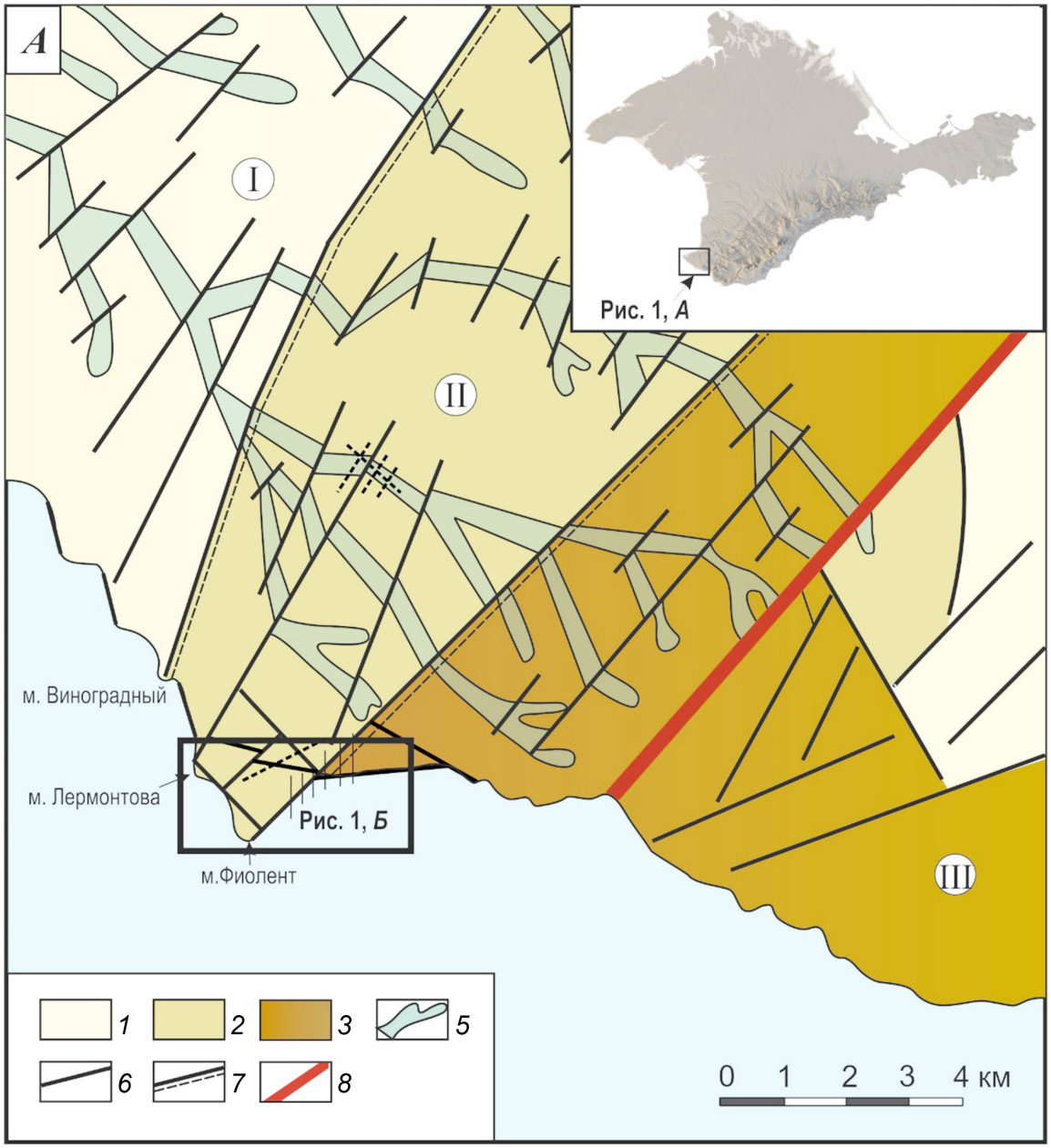
В ходе ***структурно-геоморфологического анализа*** по рисунку зон трещиноватости в плане и контрольной сетке согласных и секущих профилей выделены основные системы хребтов-поднятий и долин-впадин. Суммарное конэрозионное поднятие определяли по средним значениям высотного положения региональной денудационной поверхности для каждого выделенного блока.

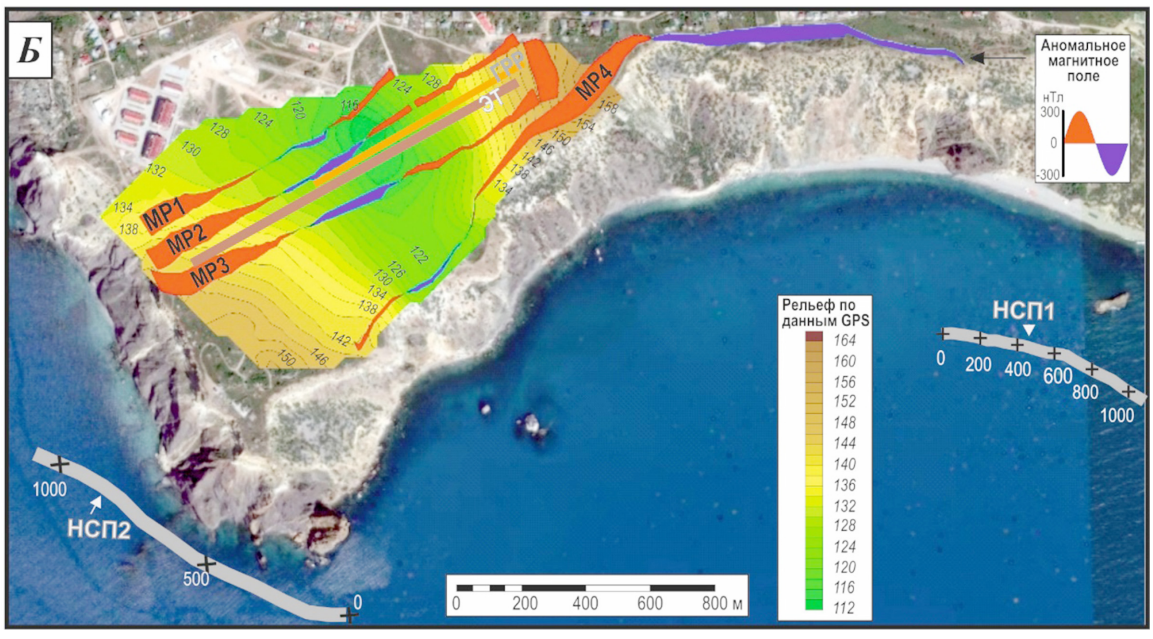
При ***геоморфологическом анализе*** горизонтального расчленения были отдешифрированы разрывы или зоны повышенной трещиноватости и дробления пород. Конэрозионное развитие структурной формы может вызвать деформацию зоны плоскостной денудации — ее наклон и разрыв, развивающиеся в результате морфологического становления структурных форм — блоков и складок. Поэтому исследование особенностей вертикального расчленения проводили по данным геоморфологических параметров: наклонов зоны водораздельной денудации, особенностей строения цикловых долин и цикловых ступеней, что позволило выделить новейшие сводовые и блоковые структурные формы, развивающиеся в рельефе. Сопоставление геоморфологических и геологических профилей в едином горизонтальном масштабе позволило уточнить выделенные структурные формы (рис. 1, *А*).

***Структурный анализ карт 3D-рельефа*** выполнен на базе морфометрического и гидрологического ГИС-анализов и цифровой модели рельефа, построенной по данным ALOS World 3D [ALOS…, 2019].

В основе ***морфометрического метода*** лежит предположение о том, что большинство новейших тектонических движений носит унаследованный характер, т. е. положительные структуры в современном рельефе связаны с тектоническими поднятиями, а от-

Рис. 1. Структурно-геоморфологическая карта м. Фиолент и прилегающих территорий (*А*), суммарные конэрозионные поднятия, в м: *1* — <100, *2* — 100–200, *3* — >200 м; *4* — овражно-балочная сеть; *5* — разрывы и зоны трещиноватости; *6* — границы структур 1-го порядка; *7* — зона Георгиевского разлома. Цифры на схеме: I — Западный сегмент, II — Центральный сегмент, III — Юго-Восточный сегмент; на врезке — схема расположения района исследований; *Б* — расположение геофизических разрезов: ЭТ — геоэлектрический, полученный методом электротомографии; МР1–4 — магнитометрические; ГГР — гравиметрические; НСП-1,2 — сейсмические разрезы по профилям НСП-1 и НСП 2


А
I
II
III
Рис. 1, А
м. Виноградный
м. Лермонтова
Рис. 1, Б
м.Фиолент
1
2
3
5
6
7
8
0 1 2 3 4 км


Б
МР1
МР2
МР3
МР4
ЭТ
Аномальное магнитное поле
нТл
300
0
-300
Рельеф по данным GPS
164
160
156
152
148
144
140
136
132
128
124
120
116
112
НСП1
0 200 400 600 800 1000
НСП2
1000 500 0
0 200 400 600 800 м

рицательные — с опусканиями, т. е. движения земной коры отражены в современном рельефе и характере речной сети. При проведении морфометрического анализа рельеф изучают для уровней, которые связаны с разными этапами развития региона. Выявленные структуры разделяют по времени образования, а также проводят количественные оценки амплитуды вертикальных движений и объема эрозии [Нугманов и др., 2016]. Алгоритм метода заключается в построении и интерпретации серии морфометрических карт по цифровой модели рельефа. Морфометрические карты отражают следующие морфометрические показатели: гипсометрический уровень, угол наклона, глубина расчленения рельефа и густота его расчленения. Общий анализ построенных карт позволяет выявить определенные комплексы рельефа, формирование которых может быть предсказано неотектонической деятельностью в пределах региона исследования [Нугманов и др., 2016].

*Карта морфометрических комплексов* — результирующая карта для морфометрического ГИС-анализа региона исследования, в результате которого построены карты основных морфометрических показателей: гипсометрических уровней, углов наклона поверхности, глубины и густоты расчленения рельефа и т. п. Полученные в ходе анализа всех этих карт морфометрические показатели легли в основу создания карты морфометрических комплексов региона исследования.

***Гидрологический анализ.*** В многочисленных публикациях обсуждается тесная связь между морфологией речных долин, генетическим типом горных пород и эпейрогеническими движениями. В соответствии с тем, что глубинные процессы влияют на формирование рельефа сильнее, чем эрозия, можно выявлять морфоструктуры и морфоскульптуры на разных этапах стабилизации базиса эрозии, что позволяет рассмотреть историю неотектонических движений региона исследования и ее взаимосвязь с современным рельефом. Для проведения гидрологического анализа была построена серия гидрологических карт, включающая карту направления стока, карту суммарного водотока, карту порядков водотоков, карты базисных поверхностей и карты разницы базисных поверхностей.

При построении карты порядков водотоков использовался метод, предложенный Р. Хортоном [1948], а затем уточненный В.П. Философовым [Философов, 1975]. Долиной 1-го порядка считалась долина, которая не принимает ни одного притока, не разветвляется. Долина 2-го порядка образуется в результате слияния двух долин 1-го порядка. Долина 3-го порядка включает в себя две долины 2-го порядка и т. д. Карты базисных поверхностей строились по рекам (водотокам) N-го порядка путем соединения точек пересечения тальвегов определенного порядка с горизонталями рельефа. Базисная поверхность 1-го порядка включала в себя местные базисы эрозии долин всех порядков, базисная поверхность 2-го порядка объединяла местные базисы эрозии долин 2-го, 3-го и всех более высоких порядков, базисная поверхность 3-го порядка объединяла местные базисы эрозии долин 3-го и всех более высоких порядков и т. д. [Философов, 1975; Нугманов и др., 2016].

Морфологические характеристики структур, формирующихся на разных этапах развития, определяли по рисунку изобазит. Сравнение карт базисных поверхностей позволило выявить относительный возраст локальных структурно-тектонических элементов. Количественная оценка амплитуды вертикальных движений за определенный интервал времени восстановлена и оценена по картам разностей базисных поверхностей смежных порядков. Это в итоге дало возможность определить результирующие смещения по вертикали (как положительные, так и отрицательные), а также локальные активные структуры. Таким образом, рассматривая последовательно базисные поверхности разных порядков, возможно восстановить картину изменения уровня базиса эрозии, а следовательно, картину развития рельефа исследуемой территории. Карты разностей базисных поверхностей, построенные для региона исследования, отражают геодинамические особенности развития территории. Их анализ позволяет охарактеризовать развитие рельефа и связать его с тектоническими структурами.

***Геофизические работы.*** Целью наземных геофизических работ было исследование выраженности в геофизических полях разломных нарушений на м. Фиолент. Комплексные геофизические исследования включали в себя наземные гравиметрические, магнитометрические, электротомографические, петромагнитные и морские сейсмические исследования.

Исследования на м. Фиолент *методом электротомографии* выполнены по одному профилю длинной 715 м (профиль ЭТ на рис. 1, *Б*). Шаг между электродами составлял 5 м. Так как дороги и условия плотной застройки на м. Фиолент не позволяли использовать бесконечность, были использованы только дипольная осевая установка и инверсная четырехэлектродная установка Шлюмберже (mABn), для которой применяется принцип взаимности, позволяющий выполнять многоканальные измерения для четырехэлектродной установки. Установка Шлюмберже — классическая установка для любых электрических зондирований. Она обладает усредненными параметрами разрешения и глубинности. В нашем случае ее использование оправдано повышением устойчивости процедуры инверсии.

Максимальный разнос АО составил 87,5 м, что обеспечило глубинность исследования около 40 м. Использовался аппаратурный комплекс Омега-48 производства ООО «Логис». Длина одной раскладки кос составляла 235 м, а соседние по профилю раскладки осуществлялись с перекрытием 50%, что позволяет получить непрерывный профиль с заданной глубинностью и оценить точность измерений на перекрытиях разных расстановок. Таким образом,

выполнено 5 раскладок, которые соответствуют пяти положениям станции на профиле наблюдения. Общее число измерений на профиле 3135. Для инверсии значений поля в геоэлектрический разрез использовали программу X2IPI. На следующем этапе с помощью программного обеспечения RES2DINV была проведена двумерная инверсия данных и сделан подбор оптимальных параметров инверсии, перед началом инверсии все измеренные данные собираются в один массив, а потом — независимо от того с какой установкой они получены — программа инверсии подбирает один геоэлектрический разрез, который соответствует минимуму функционала невязки между полевыми и теоретическим значениями кажущегося сопротивления. В нашем случае точность подбора невязки составила 4,2%, это удовлетворительный результат. По данным электротомографических исследований построен геоэлектрический разрез.

***Гравиметрические исследования*** проводили с использованием высокоточного гравиметра CG-5 компании Scintrex. Тип датчика — плавленый кварц с электростатической компенсацией; автоматическая коррекция — прилив, наклон прибора, температура, шумоподавление, сейсмический фильтр. Точность гравиметрической съемки составила 3 мкГал. Эти работы сопровождались плановой и высотной привязкой пунктов наблюдения, осуществляемой при помощи тахеометра компании Sokkia. Точность определения высоты на пунктах гравиметрической сети составила 1 см, плановых координат — 5 см.

Длина гравиметрического профиля составила 400 м, шаг по профилю 10 м (профиль ГГР на рис. 1, *Б*). В качестве опорного пункта был выбран рядовой пикет с номером 97. Относительно этого пункта проводили измерения приращения силы тяжести на профиле. Для оценки точности гравиметрической съемки выполнены контрольные наблюдения (20% от общего числа рядовых пунктов). Обработка гравиметрических наблюдений заключалась в вводе поправок за сползание нуль-пункта гравиметра, учете лунно-солнечных вариаций гравитационного поля Земли, нормального значения силы тяжести по формуле Г. Гельмерта, поправки за свободный воздух и притяжения промежуточного слоя. В результате обработки получен каталог значений силы тяжести на пунктах рядовой сети и рассчитана аномалия силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,3 г/см$^3$.

***Магнитометрические исследования*** на м. Фиолент проводили с помощью квантового магнитометра Geometrics G-858. Вариации геомагнитного поля регистрировались на полевой магнитовариационной станции (МВС), расположенной непосредственно на участке работ. В качестве МВС использован протонный магнитометр ММПОС-1 с периодом регистрации 6 с.

Магнитометрические наблюдения выполнены на четырех профилях с азимутом 58° северо-восток (профиль МР1–4 на рис. 1, *Б*). Второй профиль совпадал с профилем электротомографических и гравиметрических работ (рис. 1, *Б*), расстояние между профилями составляло 50–60 м и определялось возможностями перемещения на местности. Длина профилей по 600–800 м. Привязку точек наблюдений осуществляли с помощью спутникового приемника-навигатора GPS. По данным измерения высоты GPS при всех перемещениях в ходе работ построена карта рельефа. Измерения магнитного поля по профилям проводили через 15–20 см, что позволило отбраковывать аномалии, связанные с техногенным железным мусором и строениями. Для вычисления аномального магнитного поля вводили поправки за вариации и вычитали значение нормального магнитного поля. Поправки за вариации геомагнитного поля вводили по данным полевых магнитовариационных станций, расположенных непосредственно вблизи участка работ.

Нормальное магнитное поле вычисляли по модели IGRF на дату проведения работ как константу для всех точек (из-за незначительных размеров участка исследований). Поскольку все измерения магнитного поля имели существенно профильный характер, карты аномального магнитного поля не строили, а данные анализировали в виде карт графиков и карт классифицированных точек.

Результаты наземных магнитометрических исследований сопоставлены с гидромагнитными исследованиями, выполненными в 2016 г. на м. Фиолент А.В. Кошурниковым [Береговые…, 2018].

Важной частью проведенных магнитометрических исследований стало детальное ***петромагнитное изучение*** основных минералов-носителей намагниченности основных петрологических разностей магматических комплексов Юго-Западного Крыма. Тип и структуру минералов-носителей намагниченности пород определяли с использованием методов петромагнетизма, включавших термомагнитный анализ (термокаппаметрия), анализ параметров магнитного гистерезиса и FORC-диаграмм.

Проявившиеся аномалии магнитного поля по результатам наземных и морских работ коррелировали со структурно-геоморфологической и тектонической картами.

Исследования ***методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП)*** проводились у м. Фиолент с борта судна. Для этого использовали источник упругих волн, который представлял собой генератор электрических импульсов, состоящий из двух блоков: 1) управления и заряда емкостей по импульсной схеме и 2) емкостей с тиристорным разрядником. Энергия источника $W$=500 Дж, напряжение $U$=5 кВ, частота взрывов $F$=1 Гц.

Приемная аппаратура (буксируемое приемное устройство типа коса) включала: 1) аппаратурный комплекс по сбору данных, состоящий из усилителя с динамическим диапазоном 120 дБ и шумами, приведенными к входу 2–3 мкВ и 2) аналого-цифровой преобразователь (E-440, компания L-Card), имеющий разрядность в 14 бит под управлением

программы сбора и в дальнейшем записи данных в формате .sgy. на ноутбук.

С кормы судна были опущены два магистральных кабеля — один для буксировки и передачи данных с приемного устройства типа коса, второй — для работы и буксировки одноэлектродного электроискрового излучателя. Конструкция косы — полипропиленовый шланг диаметром 25 мм, длиной 3 м, заполненный жидкостью для разжигания костров на парафиновой основе, с шестью пьезоприемниками, соединенными параллельно. Пьезоприемники внутри шланга были распределены на базе 1 м. Параметры заполняющей шланг жидкости выбраны из расчета нейтральной плавучести косы этой конструкции. Для выпрямления косы во время буксировки к ее концу был привязан фал длиной 3 м. Для заглубления забортной аппаратуры на магистральных кабелях рядом с местами крепления излучателя и косы к кабелям были прикреплены накладные грузы общей массой 5 кг на каждый кабель.

Расстояние от конца излучателя и расстояние от середины шланга косы до крепления кабелей к борту судна составляло 32 м. Крепление кабелей к борту судна было на высоте 1,5 м от уровня воды. Для вывода косы из кильватерной струи с целью уменьшения ее шумов кабель косы был специальным выносом отодвинут от борта судна на 1,5 м.

Расстояние между источником и приемником за бортом судна составляло около 5–6 м. Глубину погружения источника и приемника выбирали из расчета 1/4 длины волны основной частоты излучения упругих колебаний для выбранной величины энергии источника. При проведении съемки использовали 2 разных излучателя: одноэлектродный низкочастотный и 20-электродный высокочастотный электроискровые источники.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В результате ***структурно-геоморфологического анализа*** на карте густоты расчленения рельефа в первую очередь хорошо выделяется эрозионная сеть постоянных и временных водотоков (рис. 1, *А*). В их простирании выделяются 2 основных направления — северо-западное и северо-восточное. Это может быть связано с наблюдаемой здесь сетью разрывных нарушений. В юго-восточной части карты сеть приобретает радиальный характер, что связано с особенностями рельефа.

Разрывы, выделенные в результате структурно-геоморфологического анализа, практически полностью совпадают с сильно расчлененными по горизонтали участками, которые в свою очередь представляют собой участки современной овражно-балочной сети. По мнению многих исследователей, современная овражно-балочная сеть закладывается по зоне трещиноватости древнего структурного плана, а разрывы, выделенные на структурно-геоморфологической карте (СГК), — молодые разрывы [Иванов и др., 2009; Муровская, Щербаков, 2011].

Расположение разрывов, выделенных по СГК, довольно четко коррелирует с выделенными углами наклона поверхности. Поверхности со значениями крутизны выше 10–15° обособляют в пределах плато обрывистые склоны у подножия Горного Крыма, которые расположены в зоне Георгиевского разлома. Борта эстуария р. Черная также довольно четко выражены в северо-восточной части в виде крутых склонов. Обрывистые участки юго-западного побережья Гераклейского п-ова также оконтурены крутыми поверхностями и хорошо коррелируют с разрывами СГК.

Крутые участки поверхности дна Черного моря оконтуривают Гераклейский п-ов, эти участки подчеркивают ступень на шельфе. В районе м. Фиолент зональные и региональные разломы прослеживаются в рисунке углов наклона.

Полученные в ходе ГИС-анализа всех этих карт морфометрические показатели легли в основу создания карты морфометрических комплексов региона исследования (рис. 2, *А*). Совокупный комплексный пространственно-тематический анализ полученных данных с данными по геологии и тектонике рассматриваемого региона позволил выявить несколько крупных областей:

Западная область включает в себя прибрежные равнины Западного берега Крыма и северо-западную оконечность Гераклейского п-ова, а также зону Николаевского поднятия. В переделах этой области отмечены участки с рельефом, мелко и очень мелко расчлененным по вертикали, со слабым и умеренным расчленением по горизонтали и полого-покатыми склонами делювиального и массового смещения материала;

Центральная область включает в себя участки низменных возвышенностей, рельеф которых расчленен средне по вертикали, умеренно и средне по горизонтали и полого-покатыми склонами делювиального и массового смещения материала;

Юго-Восточная область включает в себя участки локальных поднятий и понижений, в строении которых преобладают средне- и глубокорасчлененные по вертикали, средне- и сильнорасчлененные по горизонтали со склонами среднекрутыми, крутыми и очень крутыми, с равным соотношением выветривания и денудации, а также блокового смещения материала.

В результате ***гидрологического анализа*** построены карты базисных поверхностей разного порядка (рис. 3). На карте базисной поверхности 7-го порядка (рис. 3, *А*) наблюдается единое изометричное поднятие в юго-восточной части, где в настоящее время начинаются отроги гряд Горного Крыма. На следующем этапе (рис. 3, *Б*) наблюдается формирование двух поднятий в юго-западной и в северо-восточной частях региона исследования. Первое — изометричное, выражено не так сильно, как субмеридиональное северо-восточное. Форму поднятия нарушает четко выделяющееся понижение в рельефе, где в наши дни расположена долина р. Черная.

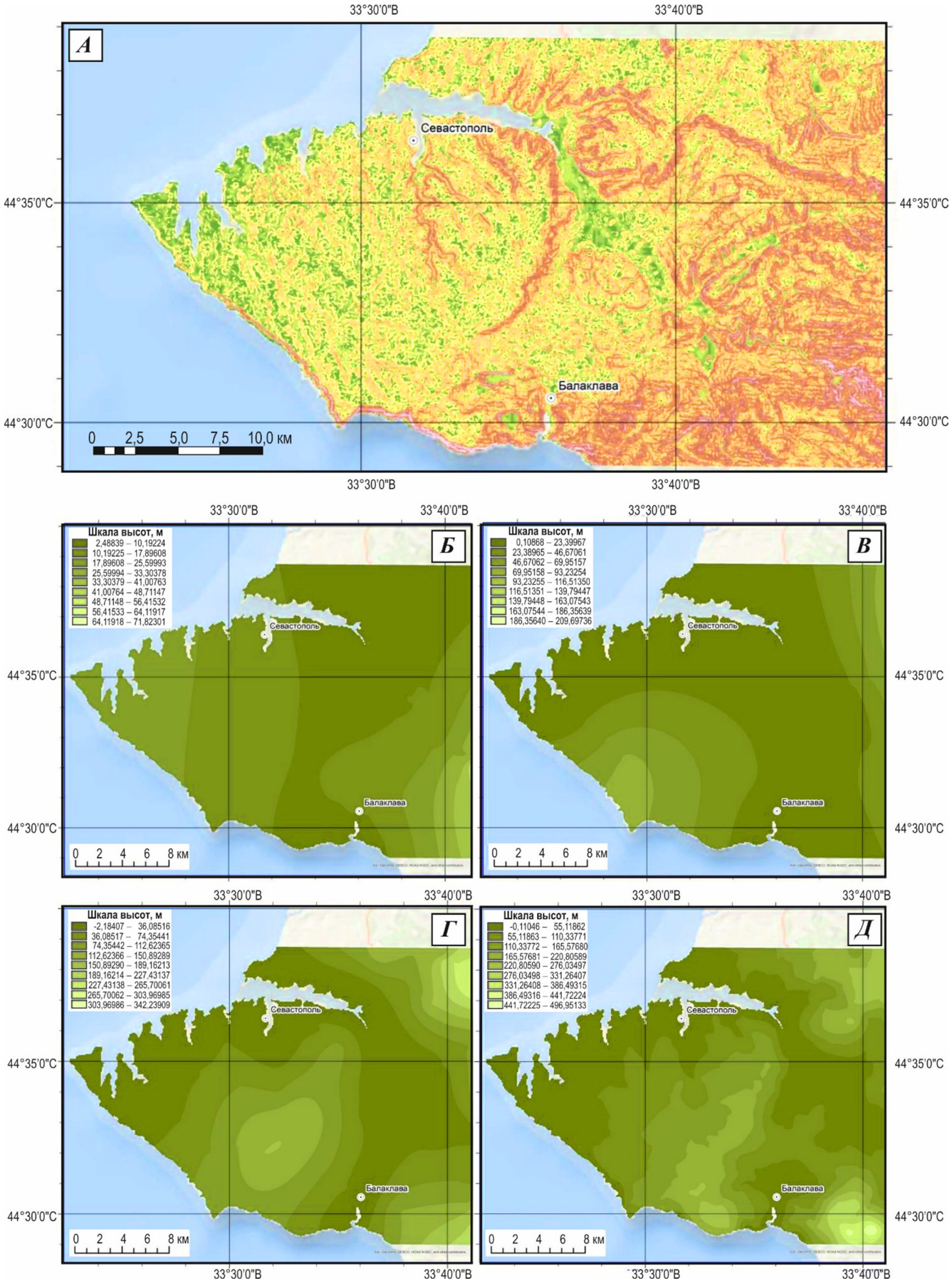



Рис. 2. Карта морфометрических комплексов рельефа Гераклейского полуострова (*А*) и карты базисных поверхностей: *Б* — 7-го порядка; *В* — 6-го порядка; *Г* — 5-го порядка; *Д* — 3-го порядка

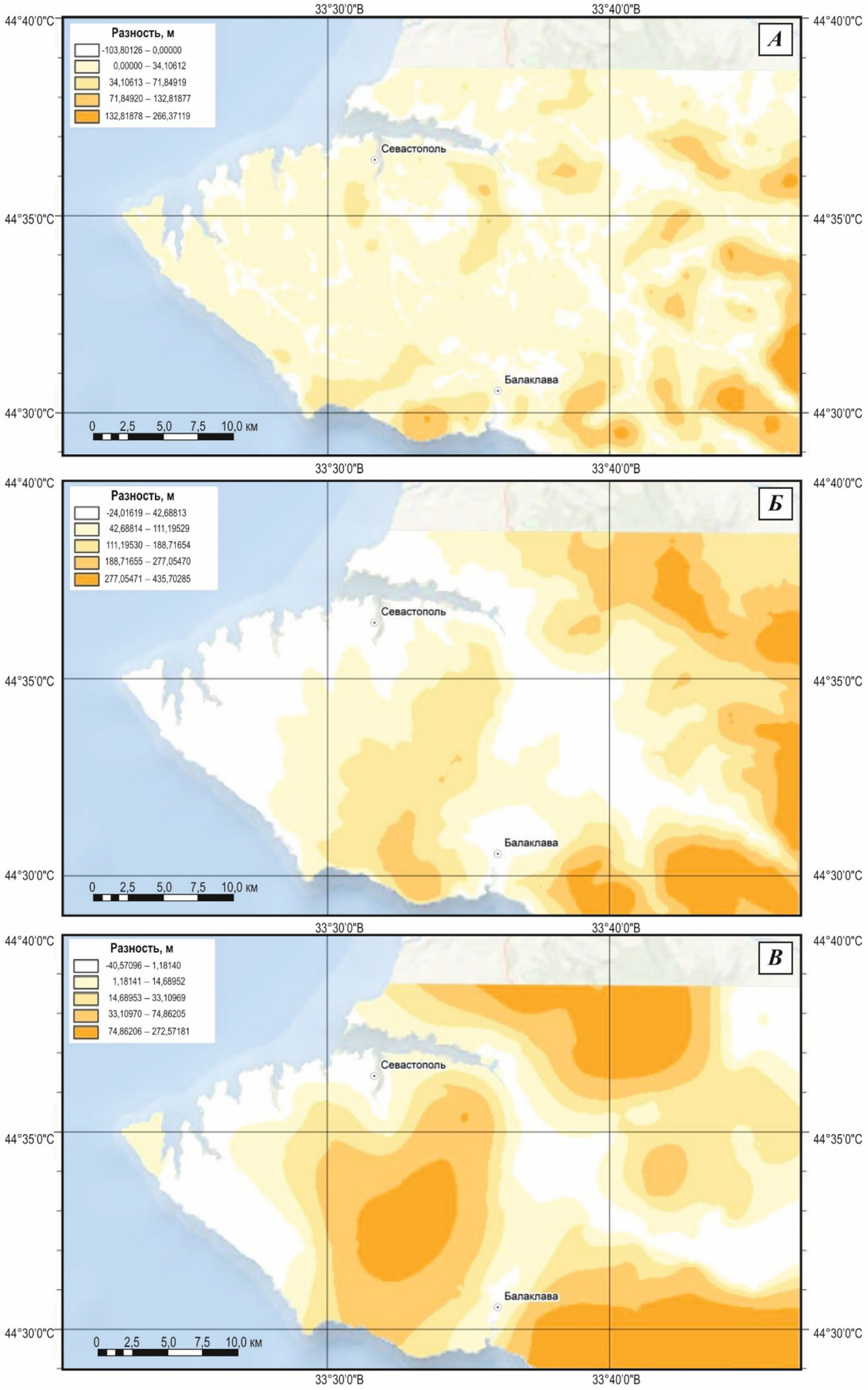



Рис. 3. Карты разностей между базисными поверхностями: *А* — 3-го и 4-го порядков; *Б* — 3-го и 7-го порядков; *В* — 5-го и 6-го порядков

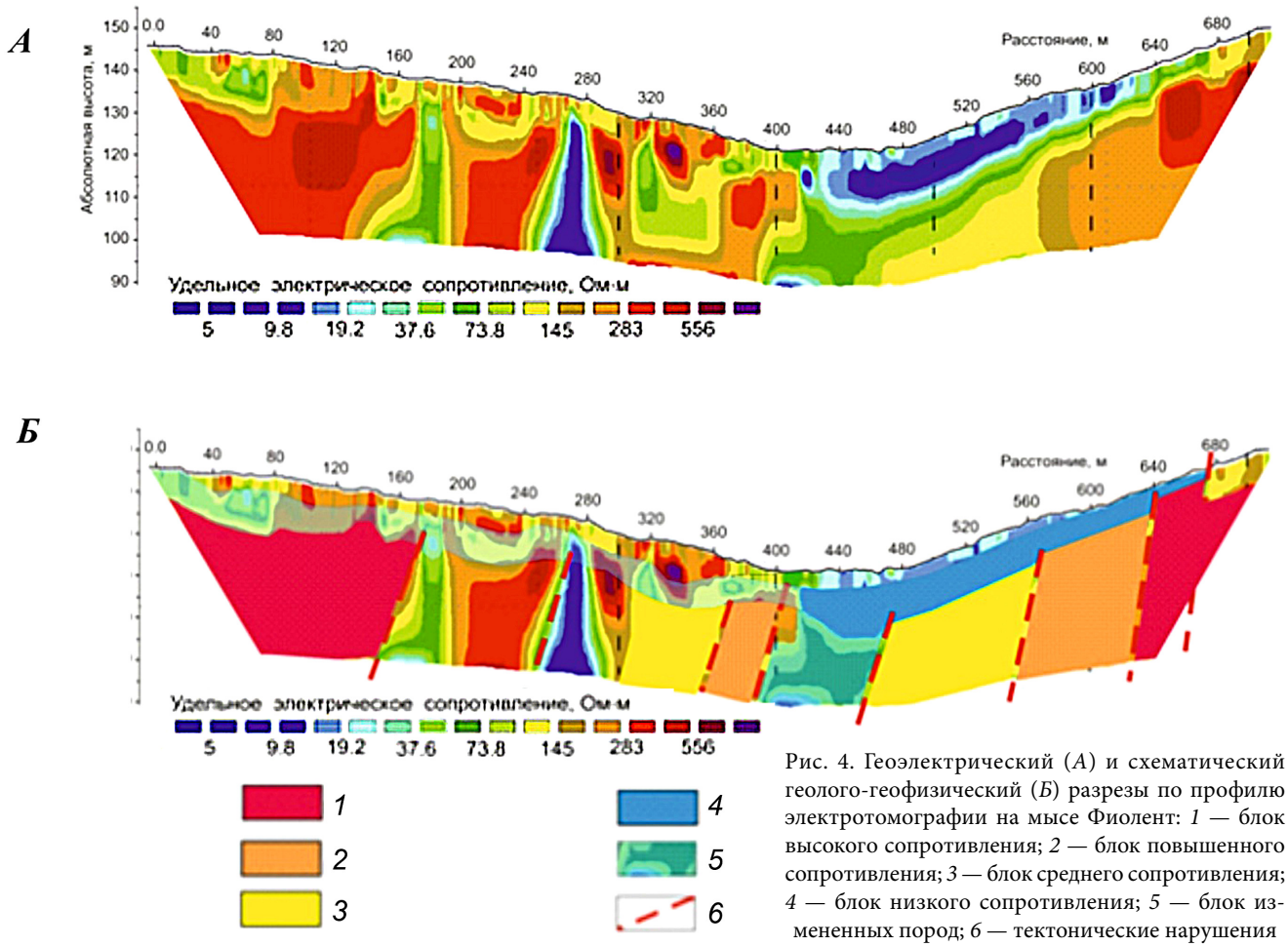



Рис. 4. Геоэлектрический (*А*) и схематический геолого-геофизический (*Б*) разрезы по профилю электротомографии на мысе Фиолент: *1* — блок высокого сопротивления; *2* — блок повышенного сопротивления; *3* — блок среднего сопротивления; *4* — блок низкого сопротивления; *5* — блок измененных пород; *6* — тектонические нарушения

На карте базисной поверхности 5-го порядка (рис. 3, *В*) видно увеличение числа локальных поднятий. Происходит развитие юго-западного поднятия в северо-восточном направлении, а также рост структур на юго-востоке. Отчетливо прослеживается граница между западными и восточными структурами, что свидетельствует об обособленности Гераклейского п-ова на данном этапе развития. Постепенно рисунок рельефа начинает напоминать современный. Территория Гераклейского п-ова на последующих этапах развития (рис. 3, *Г*) продолжает воздыматься; между западными и восточными поднятиями появляется связывающая их положительная структура, ясно прослеживается формирование долин современного положения речной сети, а положение некоторых локальных поднятий совпадает с современными положительными структурами.

***Результаты электротомографических исследований.*** *Описание геоэлектрического разреза.* Профиль длиной 700 м приурочен к балке, поперечные размеры которой приблизительно соответствуют длине профиля (рис. 4, *А*). Северная и южная стороны балки гипсометрически разнесены приблизительно на 10 м. При этом абсолютные отметки поверхности земли в северной части составляют 156 м, а в юго-западной части — 146 м. Весь профиль исследования с точки зрения строения геоэлектрического разреза можно разделить на два участка. Юго-восточный участок до пикета 420 представлен высокоомными, сильно дифференцированными породами, сопротивление которых меняется от 10 до 1000 Ом·м. При этом чем южнее и мористее, тем выше сопротивление горных пород и тем более однороден геоэлектрический разрез (рис. 4). Северо-восточный участок от тальвега оврага и севернее имеет принципиально иное строение. Здесь мы наблюдаем четко выраженный трехслойный разрез, второй слой которого представлен мощной проводящей толщей, имеющей удельное сопротивление около 7–8 Ом·м (рис. 4, *Б*). Горизонтальные размеры обнаруженного проводника около 240 м. Мощность проводящей толщи постепенно нарастает в сторону тальвега оврага от 3 м в районе пикета 660 в верхней части склона оврага до 10 м в районе пикета 440. Проводимость проводника постепенно нарастает к центру балки от 0,15 См на северо-востоке в начале склона до 0,95 См в тальвеге (рис. 4, *Б*). Нижняя часть северного склона имеет особое строение. Здесь на расстоянии 300 м в южном направлении происходит ступенчатая смена пород с высоким сопротивлением на породы с низким сопротивлением. Непосредственно под тальвегом оврага в районе пикета 400 на глубине около 30 м в разрезе проявляется локальная неоднородность с низким сопротивлением, которая имеет ширину около 40 м. Продолжение этой аномальной

зоны отмечается в виде перемычки, которая соединяет нижний и верхний проводники в одну зону.

***Результаты наземных магнитометрических и гравиметрических исследований.*** На карте графиков аномального магнитного поля выявлены две положительные зоны на самом западе мыса и в восточной части изучаемого участка (рис. 1, *Б*). Положительные зоны разделяются понижением магнитного поля, имеющим отчетливо выраженное северо-западное простирание (320° северо-запад). Несмотря на общую корреляцию аномального магнитного поля и рельефа дневной поверхности по данным GPS, можно заметить, что наибольшее понижение рельефа смещено относительно минимума магнитного поля (рис. 5, *Б*). Минимум магнитного поля смещен к югу относительно центра понижения в рельефе, что может свидетельствовать о преобладании намагниченности, индуцированной современным магнитным полем (коэффициент Кенигсбергера составляет <1). Согласно данным *петромагнитного анализа* значительный вклад в намагниченность вносит парамагнитная фракция. Основные минералы-носители намагниченности представлены пиритом и пирротином, а также сфалеритом, халькопиритом, галенитом и высокомышьяковистым пиритом. Зона пониженных значений магнитной восприимчивости (рис. 5, *Б*) в этом случае пространственно коррелирует с переходом от более высокоомного нижнего слоя к более проводящему, выявленному по данным электротомографии, что можно объяснить разломной зоной с развитыми гидротермальными изменениями, немного смещенной на юго-запад относительно минимума рельефа.

Ситуация вблизи м. Фиолент достаточно сложная: выявленная на суше отрицательная аномалия трассируется в море с некоторым смещением на запад, что может свидетельствовать либо о небольшом сдвиге по основному разлому юго-восточного блока к юго-западу, либо о падении оперяющего разлома на юго-запад (поскольку гипсометрический уровень магнитной съемки на суше и на море отличается не менее чем на 120 м).

Сопоставляя результаты магниторазведки и электротомографии, можно отметить, что минимум магнитного поля приходится на сильнонеоднородную по сопротивлению зону, расположенную в центре профиля (рис. 5, *Б*).

Длина профиля по гравиразведочным работам составила 400 м, шаг по профилю 10 м. Точность гравиметрической съемки ±0,002 мГал (рис. 5, *Б*). Точность определения высоты ±1 см. Построен график гравитационного поля в редукции Буге (плотность промежуточного слоя 2,3 г/см$^3$). По мере продвижения по профилю с юго-запада на северо-восток наблюдается понижение значений гравитационного поля. Центральная часть профиля характеризуется высоким градиентом — 0,05 мГал на 10 м. На краях профиля намечается смена величины и знака градиента. В районе пикетов 400 и 700 можно выделить положительные локальные аномалии одинаковой амплитуды 0,05 мГал. По данным электротомографии в районе этих же пикетов можно выделить границы области с пониженным сопротивлением. Максимум гравитационной аномалии приходится точно на минимум в рельефе, из чего можно предположить развитие плотного интрузивного тела по ослабленной разломной зоне.

Геологические исследования свидетельствуют, что отрицательная геофизическая аномалия связана с зоной гидротермальной переработки (рис. 5, *В–Д*).

В обнажениях берега выделяются две зоны с интенсивно измененными породами, осветленными, залегающими практически вертикально (рис. 5, *В–Д*). Эти зоны содержат сульфидную минерализацию. Основные минералы: пирит, сфалерит, галенит, халькопирит. В центральных частях массивные сульфиды сильно выветрены, эти зоны содержат много вторичных сульфатов. По ассоциации минералов это месторождение отвечает колчеданному типу. Такой тип месторождений типичен для контрастной базальт-риолитовой формации.

***Сейсморазведочные исследования.*** На рис. 1, *Б* приведена карта фактического материала. Профили НСП-1 и НСП-2 выполнены в 2016 г. методикой с высокочастотным (и, соответственно, высокоразрешающим) источником. Сейсмические разрезы для приведенных профилей показаны на рис. 6, *А, Б*. На рис. 6, *А* приведен разрез по НСП-1 (2016). Разрез представлен сверху вниз: четвертичными отложениями, миоценовыми известняками $N_1$ и среднеюрскими магматическими комплексами $J_2b$. Рельеф морского дна (голубая линия) и кровля юрских вулканитов (зеленая линия) вынесены на соответствующие карты. Разрез по профилю НСП-2 не удалось интерпретировать так детально (рис. 6, *Б*), но все же на нем прослеживается кровля вулканогенных отложений ($J_2b$), а в рельефе морского дна наблюдается выступ, отчетливо коррелирующий с сетью разрывных нарушений северо-восточного простирания около м. Фиолент, что можно видеть на рис. 1, *А, Б*.

Таким образом, по результатам электротомографических исследований удалось построить схематический геолого-геофизический разрез, представленный на рис. 4, *Б*. Общая глубина разреза составила 40–50 м. Нижние углы разреза обрезаны, так как достоверность данных в этих углах ниже, чем в центральной части. Весь разрез делится на три слоя. Верхний слой, вероятно, представлен делювиально-коллювиальными отложениями мощностью около 5 м. Южная часть профиля характеризуется более высокой мощностью этого слоя, а северная — пониженной. Второе отличие верхнего слоя заключается в том, что на южном борту балки сопротивление выше и достигает 300 Ом·м. А северный борт имеет сопротивление около 50 Ом·м и не повышается более 100 Ом·м. Поэтому можно сделать однозначный вы-

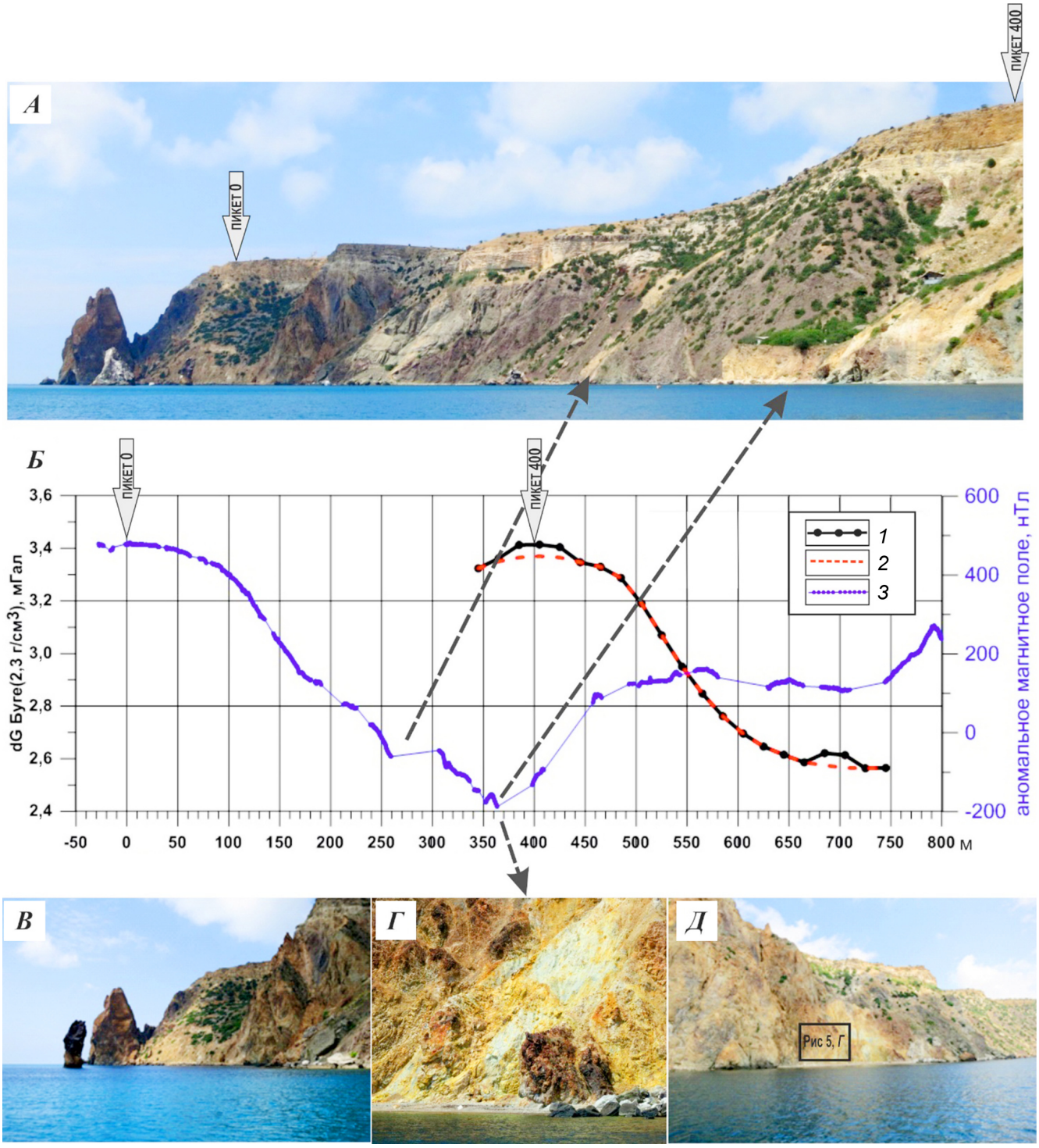



Рис. 5. Фото м. Фиолент с указанием положения электротомографических пикетов (*А*); результаты подбора гравитационного и магнитного поля вдоль интерпретационного профиля магнитной восприимчивости по магнитному полю и эффективной плотности по гравитационному полю (*Б*); *В–Д* — фото фрагментов обнажений, где выделены отрицательные аномалии магнитного поля

вод, что верхний слой на правом (северном борту) балки более глинистый.

Второй проводящий слой на южном борту также отмечается на разрезе. По результатам электротомографии его мощность составляет не более 5–6 м. А положение по высоте достаточно изменчиво. По сравнению со вторым слоем северного борта второй слой южного борта балки имеет невыдержанные свойства. Но в целом он параллелен поверхности земли. Его максимальная проводимость, составляющая 0,125 См, отмечена в районе пк 60, а в остальных частях разреза не превышает 0,05 См. Кроме того, можно отметить интересную особенность: подошва второго слоя северного борта имеет ступенчатую форму, которая, вероятно, контролируется разрывными нарушениями. При этом мощность второго слоя здесь увеличивается в направлении к тальвегу оврага скачком на 2–3 м.

Наиболее сложное строение имеет третий — нижний — слой. Он имеет блоковое строение, а его

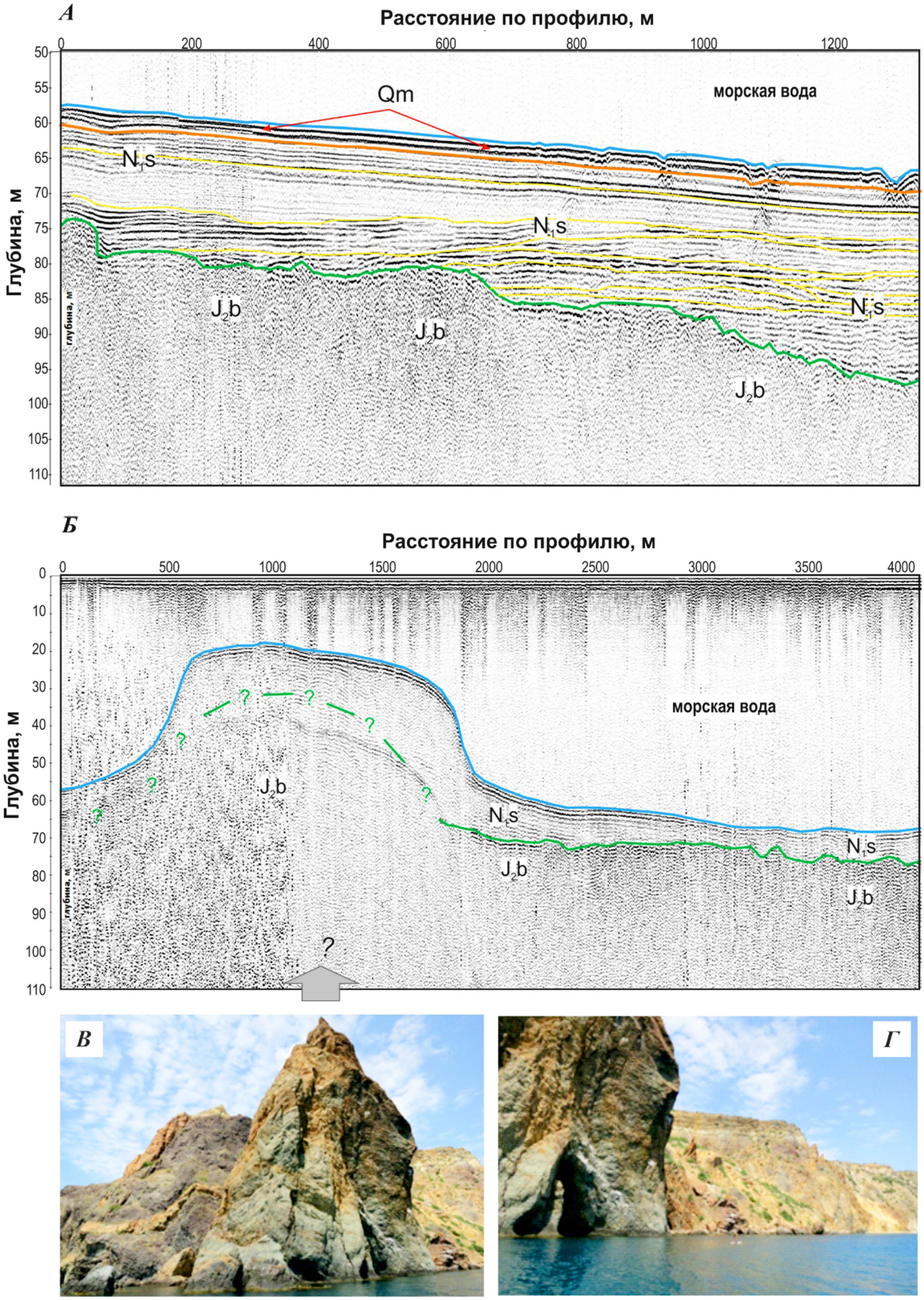



Рис. 6. Результаты морских сейсмических исследований на м. Фиолент: *А* — профиль НСП-1 на рис. 1, *Б* (2016), длина профиля 1300 м; *Б* — профиль НСП-2 на рис. 1, *Б* (2016), длина профиля 4000 м; голубая линия — морское дно, зеленая — кровля магматитов среднеюрского возраста; *В*–*Г* — береговые уступы среднеюрских магматитов

сопротивление сильно меняется в горизонтальном направлении. Блоки нижнего слоя, по нашему мнению, разделены швами тектонических нарушений, которые круто падают на юго-запад под углом около 60–70°. Всего можно наблюдать как минимум 8 блоков. Размеры блоков меняются от 30 до 160 м. Важная особенность блочной структуры — их сильная дифференциация по сопротивлению. Выделена следующая закономерность: чем дальше от оси балки находится блок, тем более высокое сопротивление имеют породы. Таким образом, блоки с высоким сопротивлением пород расположены на крайних южных и северных бортах структуры, а блоки с средним и низким сопротивлением расположены в центре балки, вблизи ее тальвега. Общий горизонтальный размер блоков с пониженным сопротивлением составляет 460 м.

Поэтому можно сделать вывод о том, что эта геологическая структура представляет собой мощную разломную зону, которая имеет ширину около 400–500 м и в ней отмечены отдельные двумерные и трехмерные блоки в разной степени измененных пород.

Мощное проводящее тело, которое залегает в северном борту балки, образует локальную положительную аномалию магнитного поля. Крайне низкие значения удельного сопротивления этого тела могут иметь разное происхождение. Одна из причин может заключаться в том, что это сохранившийся фрагмент слоя глин, которые описаны в составе миоценовых отложений [Государственная…, 1984]. Учитывая, что на южном борту балки в геоэлектрическом разрезе слой глин отсутствует, то можно предположить, что крыло, расположенное в южном борту балки, приподнято относительно северного крыла по крайней мере на 40–50 м. В то же время породы миоцена, которые выходят на поверхность земли на Гераклейском п-ове, повсеместно падают под небольшим углом от 2 до 4° на северо-запад. Если базироваться на том, что электротомографический профиль проходит с северо-востока на юго-запад, то отложения нижнего неогена должны были бы спроецироваться на геоэлектрический разрез в виде горизонтально лежащего слоя, что, однако, не наблюдается. Проводник падает на юго-запад под углом как минимум 9°, что совершенно не укладывается в концепцию нормального геологического происхождения этих глин. Поэтому мы склоняемся к другому происхождению глинистой толщи. Вероятно, это мощная зона переработки (или выветривания), сформировавшаяся в зоне тектонического нарушения под действием процессов аномального давления и деструкции.

Особый рисунок трещиноватости наблюдается в среднеюрских вулканитах м. Фиолент в зоне Георгиевского разлома северо-восточного простирания. Здесь доминируют разрывы северо-восточного простирания (30–40° и 60–70°). При этом трещины с простиранием 30–40° преимущественно субвертикальные и сопряжены с субвертикальными же разрывами северо-западной ориентировки, сформированными в сдвиговом поле меридионального растяжения и субширотного сжатия [Муровская, Щербаков, 2011]. В то же время нарушения с простиранием 60–70° падают на юго-восток под углами 80–45° и образуют структурные парагенезы, указывающие на взбросовый характер деформации с горизонтальным положением оси сжатия (азимут 160–170°) и субвертикальным положением оси растяжения [Муровская, Щербаков, 2011].

В магматических образованиях рядом с Георгиевским разломом часто встречаются сколы северо-западного простирания, которые прослеживаются и в неогеновых известняках. По сколам отмечены жилки цеолитов, что указывает на формирование этих сколов в период вулканической деятельности. Деформации же неогеновых отложений связаны с активизацией разрывных дислокаций северо-западных простираний в постнеогеновый этап [Муровская, Щербаков, 2011].

**Заключение.** Выполнен комплекс геолого-геофизический работ по изучению трещиноватости в юрско-неогеновых породах Гераклейского плато, включавший полевое изучение зоны Георгиевского разлома и структурно-геоморфологический анализ. Геофизический комплекс исследований объединял морские сейсмические и магнитометрические съемки в сочетании с наземными методами электротомографии, гравиметрии, магнитометрии, а также петромагнитные исследования. Основным объектом изучения была зона глубинного Георгиевского разлома и оперяющие тектонические нарушения.

В результате комплексных исследований установлены главные геолого-геофизические критерии выделения опасных участков трещиноватости: 1) крайне неоднородное строение верхней части геоэлектрического разреза до глубины 30–40 м по данным электроразведки; 2) сейсмические данные свидетельствуют о том, что в зонах повышенной трещиноватости миоценовые известняки имеют крайне низкие прочностные свойства; 3) по электроразведочным данным обводненность (влажность) верхней части разреза резко меняется по горизонтали; 4) на закарстованных территориях на определенной глубине наблюдается резкая изменчивость удельного сопротивления от максимально больших значений до минимальных; 5) довольно активно трещиноватость развивается под действием оползневых процессов.

Особенно опасны трещины растяжения, которые возникают на участках положительного рельефа пород основания, по которым происходит скольжение оползневых тел, представленных известняками.

***Финансирование.*** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-45-920073) и стратегического проекта № 3 Программы Приоритет-2030 СевГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Береговые процессы: мониторинг и инновационные комплексные исследования: Учебное пособие / В.С. Исаев, Кошурников А.В., Игнатов Е.И. и др. / Под ред. Е.И. Игнатова, В.С. Исаева. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2018. 246 с.

Государственная геологическая карта Горного Крыма в масштабе 1:200 000 / Глав. ред. Н.Е. Деренюк, составил С.Е. Пивоваров. Киев, геолого-картографическая партия ЦТЭ, 1984.

*Иванов В.Е., Ломакин И.Э., Тополюк А.С.* и др. Особенности тектоники юго-Западного Крыма // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 4. С. 27–39.

*Костенко Н.П.* Геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 398 с.

*Муровская А.В., Щербаков Р.Н.* Структурно-кинематические парагенезисы и деформационные режимы Гераклейского блока Юго-Западного Крыма // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Гірничо-геологічна. 2011. Вип. 13 (178). С. 122–128.

*Нугманов И.И., Нугманова Е.В., Чернова И.Ю.* Основы морфометрического метода поиска неотектонических структур: Учебно-методическое пособие. Казань: Казанский ун-т, 2016. 53 с.

*Промыслова М.Ю., Брянцева Г.В., Демина Л.И., Косевич Н.И.* Новейшие структуры Гераклейского полуострова (Юго-Западный Крым) // Вестн. Моск. ун-та, 2019. № 2. С. 8–16.

*Рубцова Е.В.* Особенности строения миоценовых отложений южной части Гераклейского плато // Планета Земля: актуальные вопросы геологии глазами молодых ученых и студентов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 111–117.

*Философов В.П.* Основы морфометрического метода поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 232 с.

*Хортон Р.Е.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1948. 212 с.

*Шнюков Е.Ф., Лысенко В.И., Кутий В.А., Шнюкова Е.Е.* Золото-серебряная и сульфидная минерализация в породах Гераклейского плато (Крым) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2019. № 2. С. 68–86.

*Шнюкова Е.Е.* Магматические породы мыса Фиолент (Юго-западный Крым): Мат-лы международного (X Всеросс.) петрографического совещания «Петрография XXI века». Т. 2. Кольский научный центр РАН, Геологический институт, 2005. С. 289–291.

*Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Симферополь: ДИАЙПИ, 2011. 333 с.

ALOS Global Digital Surface Model «ALOS World 3D — 30 m (AW3D30)» [Электронный ресурс]. URL: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm (дата обращения: 18.02.2019).

*Nikishin A.M., Okay A., Tiusuz O.* et al. The Black Sea basins structure and history: new model based on new deep penetration regional seismic data. Pt. 2: Tectonic history and paleogeography // Marine and Petrol. Geol. 2015a. Vol. 28 (3). P. 728–743. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2014.08.018.

*Nikishin A.M., Wannier M., Alekseev A.S.* et al. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus // Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 2015b. Vol. 428. P. 241–264. DOI: 10.1144/SP428.1.

*Yegorova T., Gobarenko V., Murovskaya A.* Jurassic-Cretaceous magmatic arcs in the Eastern Black Sea: Evidence from geophysical studies and 2D modeling // J. Geodynamics. 2022. Vol. 149. 101890. https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101890.

Статья поступила в редакцию 06.06.2022,
одобрена после рецензирования 08.06.2022,
принята к публикации 26.01.2023