

УДК 550.82:004.94+55(477.75)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-23-31

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ РАЗРЕЗА ГОРЫ СУВЛУ-КАЯ, ЮГО-ЗАПАДНЫЙ КРЫМ

Максим Валерьевич Коротаев^{1✉}, Наталья Витальевна Правикова²,
Павел Анатольевич Фокин³, Татьяна Юрьевна Тверитинова⁴,
Екатерина Романовна Чижова⁵, Александр Иванович Кизяков⁶,
Екатерина Александровна Лыгина⁷

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; korm1111@yandex.ru✉, <https://istina.msu.ru/workers-beta/423979/>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; npravikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5605-9261>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; fokinpav@rambler.ru, https://istina.msu.ru/profile/Fokin_PA/

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tvertat@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/TTveritinova/>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; chizhova_er@mail.ru, <https://istina.msu.ru/profile/erchizhova/>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; akizyakov@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers-beta/1272213/>

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ealygina@mail.ru, <https://istina.msu.ru/profile/LyginaEA/>

Аннотация. Выполнено моделирование трещиноватости в разрезе горы Сувлу-Кая, ЮЗ Крым. Построена трехмерная геологическая модель разреза, проведено геомеханическое моделирование, рассчитаны поля напряжений в трехмерной геологической структуре. Результаты моделирования сравнены с реальными замерами трещиноватости в поле.

Ключевые слова: геомеханика, моделирование, трещины, Юго-Западный Крым

Для цитирования: Коротаев М.В., Правикова Н.В., Фокин П.А., Тверитинова Т.Ю., Чижова Е.Р., Кизяков А.И., Лыгина Е.А. Геомеханическое моделирование трещиноватости разреза горы Сувлу-Кая, Юго-Западный Крым // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 23–31.

GEOMECHANICAL FRACTURE MODELING OF THE SUVLU-KAYA MOUNTAIN SECTION, SOUTH-WEST CRIMEA

Maksim V. Korotaev^{1✉}, Natalya V. Pravikova², Pavel A. Fokin³,
Tatyana Yu. Tveritinova⁴, Ekaterina R. Chizhova⁵, Aleksander I. Kizyakov⁶,
Ekaterina A. Lygina⁷

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; korm1111@yandex.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; npravikova@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; fokinpav@rambler.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tvertat@yandex.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; chizhova_er@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; akizyakov@mail.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ealygina@mail.ru

Abstract. Fracture modeling in the section of Suvlu-Kaya Mountain, South-West Crimea, was made. A three-dimensional geological model of the section was constructed, geomechanical modeling was performed, and stress fields in the three-dimensional geological structure were calculated. The modeling results were compared with real measurements of fracturing in the field.

Keywords: geomechanics, modeling, fractures, South-Western Crimea

For citation: Korotaev M.V., Pravikova N.V., Fokin P.A., Tveritinova T.Yu., Chizhova E.R., Kizyakov A.I., Lygina E.A. Geomechanical fracture modeling of the Suvlu-Kaya Mountain section, South-West Crimea. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 23–31. (In Russ.).

Введение. Район исследований находится на северо-западной периклинали Качинского поднятия (антиклинория) Горнокрымского мегантиклинория,

в Бахчисарайском стратотипическом районе [Зернецкий и др., 2014]. Целью исследования является восстановление полей напряжения по трещинам

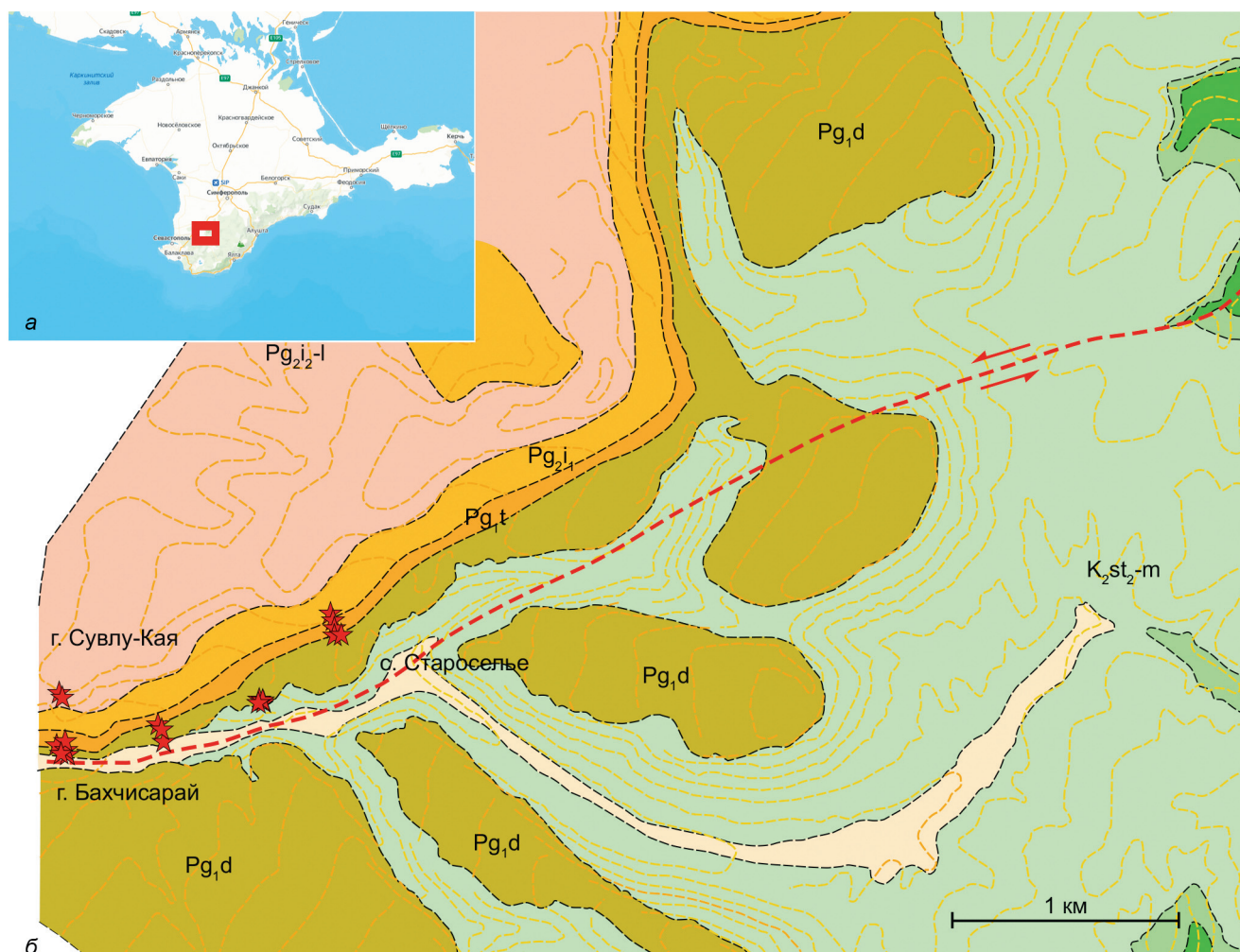


Рис. 1. Расположение разреза г. Сувлу Кая на топографической карте (а) и геологической карте (б). Красные звездочки — места замера трещин, красная пунктирная линия — предполагаемое продолжение Бодракского разлома

в карбонатных породах палеогенового возраста, восстановление структуры моноклинально залегающих слоев палеогена к додеформированному состоянию, трехмерное моделирование трещиноватости и корреляция результатов моделирования с региональными деформациями.

Восстановленные поля напряжений соответствуют условиям образования моноклинали и могут быть увязаны с ростом горноскладчатого сооружения. Полученные результаты указывают на изменение полей напряжения на альпийском этапе развития и позволяют выделить раннеэоценовые деформации.

Материалы и методы. Строение палеогеновых отложений на восточной окраине г. Бахчисарай (с. Староселье, г. Сувлу-кая, Юго-Западный Крым). Горнокрымский ороген представляет собой область киммерийской складчатости с широко проявленными альпийскими деформациями [Муратов, 1973; Геологическое..., 1989], в пределах которого выделяется складчатый фундамент (верхнетриасово-юрские породы) и мел-миоценовый чехол. Последний залегает полого моноклинально с падением на запад, северо-запад под углами не более 10–12°, что

явилось следствием альпийского орогенеза. В этот период развития, как было показано ранее [Nikishin et al., 2014; Лыгина и др., 2019, 2022], деформации проходили в несколько этапов. Первый из них приходится на начало эоцена, фиксируется наиболее уверенно в Центральном Крыму продолжительным перерывом, формированием отдельных разломов и зон трещиноватости и увязывается с основной фазой складчатости в Понтидах (Северная Турция). Второй этап начинается в олигоцене [Никишин и др., 2006] — миоцене [Семенов, 2003], связан с общим поднятием горного сооружения, формированием моноклинали, а в ее пределах новых систем трещин и реактивацией старых. Структурные преобразования этого этапа проявлены по всему разрезу и повсеместно как наиболее молодые и выраженные.

Замеры трещин проводились на восточной окраине г. Бахчисарай и в с. Староселье, в датских и верхнеипрско-нижнелютетских отложениях (рис. 1). Здесь верхняя часть маастрихтских отложений и датские известняки формируют высокий отвесный уступ, мергели танета и глины нижнего ипра — пологий задернованный склон; нуммулитовые известняки верхнего ипра — нижнего лютета,

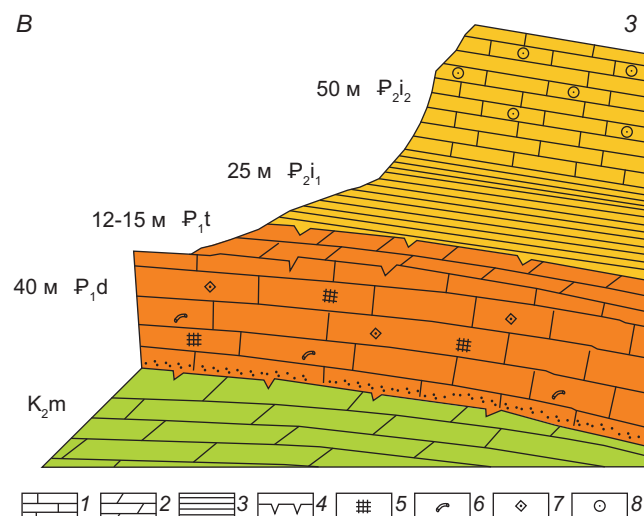


Рис. 2. Схематический геологический разрез г. Сувлу-Кая: 1 — известняки; 2 — мергели; 3 — глины; 4 — поверхность твердого дна; 5 — мшанки; 6 — серпулы; 7 — криноидеи; 8 — нуммулиты

являясь менее прочными, чем датские, формируют в рельефе выпуклые крутые склоны с участками бастионных форм выветривания (рис. 2). Слои имеют в целом западные углы падения (Аз.пд. 3-275, у.п.7°), с постепенным разворотом к северо-западным в восточном направлении.

В основании разреза палеогеновых отложений хорошо выражена поверхность размыва маастрихта — твердое дно со следами сверлений и ходами талассиноидных раков, заполненными карбонатным глауконит-кварцевым песком датского возраста. Отложения маастрихта здесь представлены мергелями алевритовыми, глауконитовыми с многочисленными рострами белемнитов и раковинами пектенид.

Основная часть датских отложений представлена известняками органогенно-обломочными криноидно-мшанковыми и серпулово-криноидно-мшанковыми, в нижней части с мергелями светло-серыми алевритистыми и с рыхлыми глауконит-кварцевыми песчаниками в основании. Общая мощность составляет 40 м.

Поверхность контакта датских и танетских отложений несогласная, неровная, с современным карстом, интерпретируется как каменное дно. Датские известняки в кровле разреза розоватого цвета, очень крепкие, массивные, со скоплениями перемытой битой и целой ракушки крупных толстостенных двустворок.

Танетские отложения представлены мергелями, в основании зеленовато-серыми алевритовыми глауконит-кварцевыми, выше светло-серыми с кремнистыми стяжениями, развивавшимися по губкам, сменяющимися мергелями серыми неслоистыми. Общая мощность составляет около 12–15 м.

Ипрские отложения залегают с четко выраженным несогласием на породах танета. Нижнеипрская часть представлена в основании песками глинистыми, глауконитовыми, с желваками фосфоритов

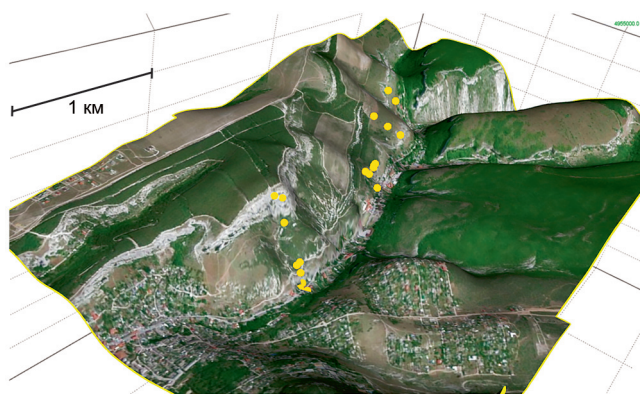


Рис. 3. Трехмерная модель рельефа г. Сувлу-Кая и точки замеров трещиноватости. Оранжевые точки — места замеров трещин

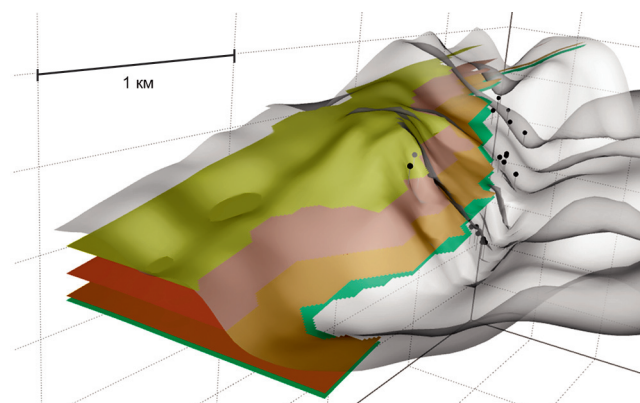


Рис. 4. Моноклиальная структура палеогеновых отложений и детальный рельеф г. Сувлу-Кая. Полупрозрачная поверхность — детальный рельеф, плоскости — поверхности подошв верхнего (желтый) и нижнего (коричневый) ипра, танета (оранжевый) и дания (зеленый). Черные точки — места замеров трещин

(0,5 м), выше сменяясь глинами коричневатого-серыми известковыми с нуммулитами, в нижней части слабо алевритовыми. Верхняя часть разреза нижнего ипра представлена постепенным, но довольно быстрым переходом от глин к нуммулитовым мергелям и еще выше к нуммулитовым известнякам верхнего ипра. Граница нижнего и верхнего ипра здесь согласная. Мощность отложений нижнего ипра около 25 м, верхнего ипра — нижнего лютета — более 50 м.

Трехмерная геологическая модель разреза Сувлу-Кая. Составлена трехмерная геологическая модель разреза Сувлу-Кая, включающая:

- 1) цифровой рельеф, совмещенный с космоснимком;
- 2) детальную цифровую модель рельефа, построенную по материалам стереосъемки с БПЛА;
- 3) 4 структурные поверхности подошв верхнего и нижнего ипра, танета и дания, построенные по элементам залегания и границам этих подразделений на поверхности (рис. 3, 4).

Замеры трещин. Для анализа полей напряжения были произведены замеры трещин в отложениях двух стратиграфических уровней: дания-танета и эоцена на северо-восточной окраине г. Бахчиса-

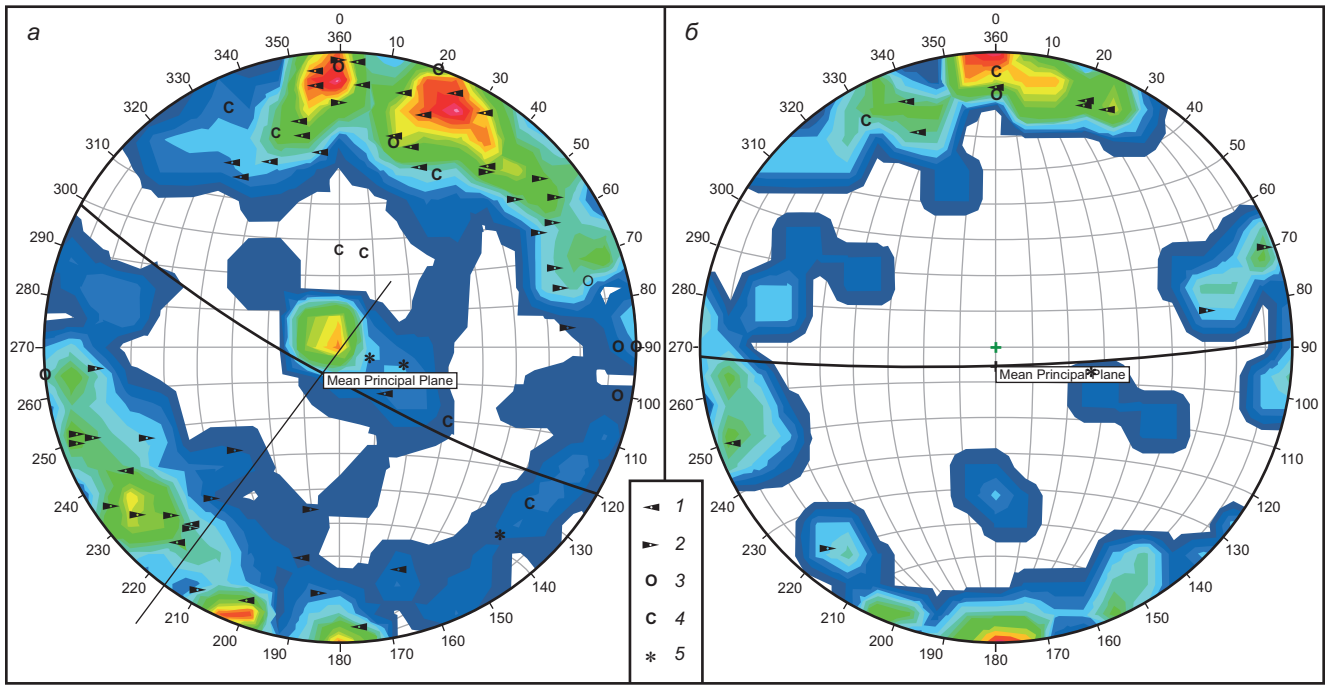


Рис. 5. Стереогаммы замеров трещиноватости (нижняя полусфера): а — в известняках и мергелях дания и танета; б — в нуммулитовых известняках верхнего ипра — нижнего лютета (нижняя полусфера). Сколы — левосдвиговой (1) и правосдвиговой (2) кинематики; 3 — отрывы; 4 — сколы сбросовой кинематики; 5 — кальцитовые жилы

рай и в районе с. Староселье (20 точек наблюдений, 476 замеров). Кинематический тип притертых трещин определялся по возможности, в основном — по особенностям строения зеркал скольжения, реже — по смещению реперных поверхностей и сопутствующим парагенезам. Практически все выявленные зеркала скольжения принадлежат сколам с пологой — 0–15°, до 30°, лишь в единичных случаях больше — ориентировкой тектонической

штриховки. Расположение точек замеров приведено на рис. 3 и 4. Стереогаммы замеров трещиноватости приведены на рис. 5. Поля трещин для этих уровней существенно различаются, что предполагает разные этапы и условия их формирования. Анализ трещиноватости и восстановленных по ним полей напряжения приводится в разделе *Анализ полей напряжения*.

Методика моделирования. Проведено геомеханическое моделирование в программном пакете Midland Valley Move по стандартной методике (рис. 6), включающей:

- восстановление моноклиальной структуры к додеформированному состоянию;
- расчет полей напряжений для исходного и восстановленного разрезов;
- распределение полей напряжений в трехмерном пространстве;
- моделирование зон трещиноватости в объеме;
- сравнение модельных зон трещиноватости с замерами и корректировка модели.

Методика геомеханического моделирования и моделирование трещиноватости. Модуль геомеханического моделирования — это инструмент, позволяющий деформировать или восстановить трехмерную геологическую структуру, используя поверхности и объемные модели. Модуль позволяет определить поля напряжений путем расчета гетерогенных (не плоскостных) смещений и может быть использован для проверки правильности модели и детального структурного анализа.

Модуль геомеханического моделирования использует метод «масс-на-пружинах» [Wang et al.,

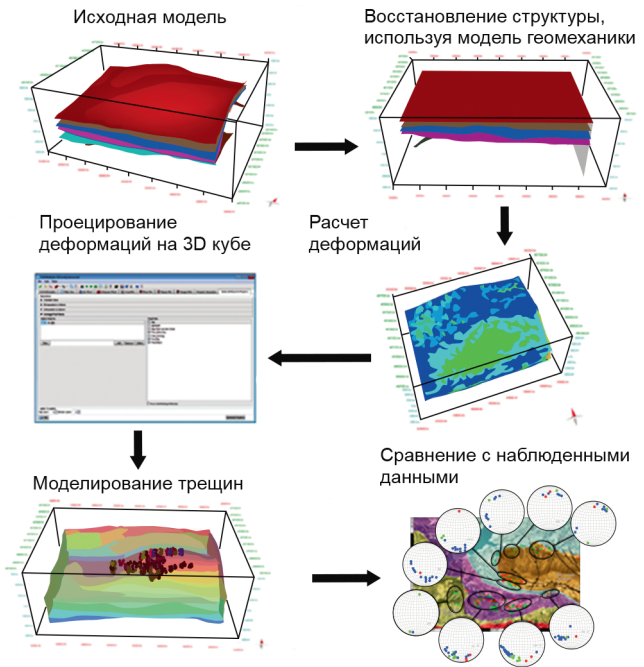


Рис. 6. Последовательность операций при геомеханическом моделировании и моделировании трещиноватости (www.mve.com)

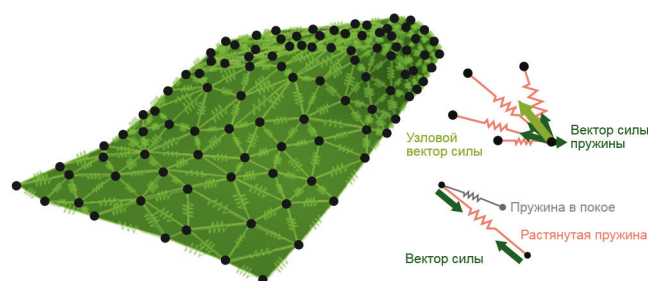


Рис. 7. Схема работы метода «масс-на-пружинах», его элементы и действующие силы (www.mve.com)

2006; www.mve.com]. Это упрощенная итеративная техника, использующая механические свойства пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона), слагающих горизонты модели, и определяющая их упругую реакцию (рис. 7).

Для поверхностей процесс берет исходную сетку и деформирует ее до современного состояния или уровня по высоте. Исходная сетка представляется как набор масс и пружинок. Пружинки традиционно располагаются вдоль краев треугольников, составляющих сетку, а массы — в углах сетки. Граничным условием модели является проекция целевой поверхности (современное состояние). Проекция изменяет форму поверхности, которая меняет длину треугольных краев, загружая пружинки модели. Пружинки используются, чтобы рассчитать силы на точках масс, которые управляют траекториями точек масс и моделируют физическое поведение поверхности под воздействием неоднородных сил.

Поверхности в геомеханическом моделировании постепенно проецируются на целевую поверхность за определенное пользователем количество «шагов проецирования» (P_n), что гарантирует, что силы в модели остаются стабильными на протяжении всего моделирования.

Инструмент «Моделирование трещиноватости» предназначен для анализа деформаций на восстановленных и смоделированных поверхностях и использования этих тензоров деформаций в качестве показателя интенсивности (плотности) и ориентации трещин путем применения концептуальных геологических моделей образования трещин.

При моделировании трещиноватости учитываются следующие параметры: область возникновения трещин, интенсивность, ориентировка и длина трещин, верхние и нижние ограничивающие пласты и соотношение сторон трещин, ширина их открытия.

Некоторые из этих параметров устанавливаются из анализа и понимания структурной истории, некоторые — как результат геомеханического моделирования и анализа полей напряжений. Для задания ориентировки трещин при моделировании можно использовать ориентацию деформаций, полученных при геомеханическом моделировании.

Результаты исследований и их обсуждение.

Результаты моделирования. В результате моделиро-

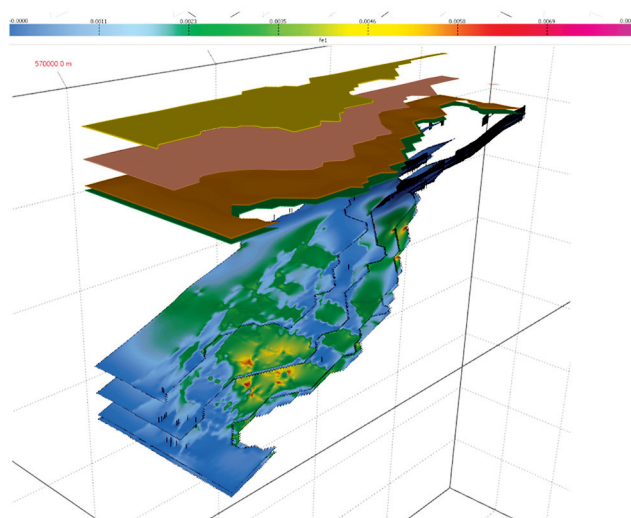


Рис. 8. Структурные поверхности подошв верхнего (желтый) и нижнего (коричневый) ипра, танета (оранжевый) и дания (зеленый), восстановленные к исходному додеформированному состоянию (вверху). Те же поверхности в современном моноклинальном залегании (внизу), цветом показана величина деформаций

вания подошвы дания и верхнего ипра восстановлены к додеформированному состоянию (рис. 8). В результате этого получены поля деформаций в трехмерном пространстве.

На основании определенных в результате геомеханического моделирования деформаций было произведено моделирование трещиноватости. В результате получены наборы трещин по всему объему модели (рис. 9).

Геомеханические свойства пород (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) выбраны из стандартных литотипов программы Move для глин (модуль Юнга = 32 500 МПа, коэффициент Пуассона = 0,3) и известняков (модуль Юнга 45 000 МПа, коэффициент Пуассона = 0,22). Плотность сети трещин ($0,0125 \text{ m}^2/\text{m}^3$), средний размер трещин (3,5–10 м). Ориентировка главных систем трещин определена по результатам геомеханического моделирования.

Анализ полей напряжений. Относительно легко дается интерпретация небольшого числа групп трещин в нуммулитовых известняках. Наиболее многочисленные субвертикальные широтные и субширотные трещины — в основном сколы с левосдвиговой кинематикой, и среди них вычлняются широтные трещины генерального сдвига и относительно них — еще две группы трещин, удовлетворяющие положению первичных и вторичных риделевских сколов. Все три группы сколов образуют парагенез широтной зоны левого сдвига, условий северо-восточного сжатия (рис. 10, а). Крутые сколы правосдвиговой кинематики или входят в тот же парагенез как антириделевские сколы, или образуют парагенез с широтными сколами согласно модели Кулона — Андерсона, с похожей ориентировкой СВ сжатия (рис. 10, б), хотя его ось и располагается в тупом углу между сколами.

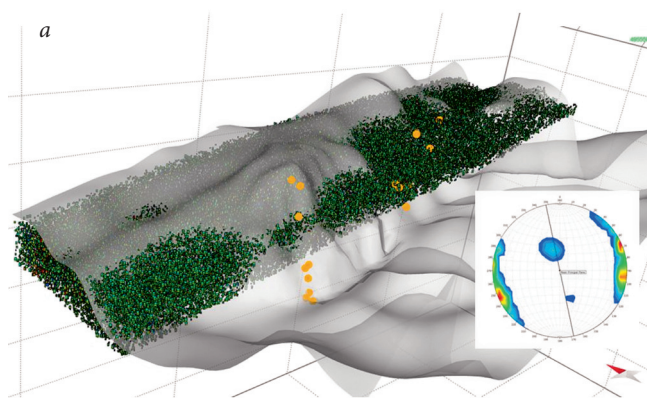
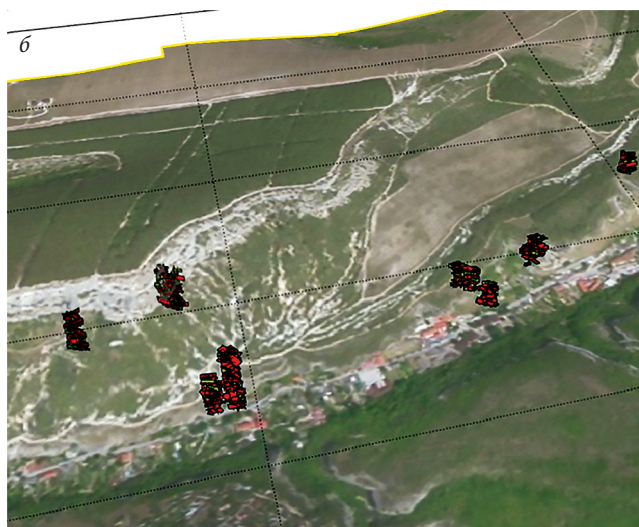


Рис. 9. Результаты моделирования трещиноватости: *а* — во всем массиве трехмерной модели, *б* — в местах замеров. На врезке — стереограмма полюсов трещин, сгенерированных на основе результатов геомеханического моделирования (нижняя полусфера)



Трещины прочих ориентировок не образуют явных парагенезов (рис. 10, *в*), однако расположение крутопадающих на СВ сколов с правосдвиговыми смещениями удовлетворяет ориентировкам сжатия от северо-северо-восточного до северо-западного. Еще двусмысленнее положение сбросов и отрывов широтного и северо-восточного простираения. Эти трещины обстановок растяжения могли формироваться в условиях СВ и широтного сжатия, однако при близких ориентировках обрывов и наличии под известняками пластичной «подушки» глин такие смещения по трещинам могут объясняться и боковым отпором.

Трещины в палеоценовых породах (в основном в известняках датского яруса) образуют больше групп, и часто одно сгущение полюсов образуют дизъюнктивы разной кинематики (рис. 10). Так, субвертикальные широтные трещины в датских известняках имеют как лево-, так и правосдвиговые смещения, отрывы и сколы со сбросовой кинематикой; совместные поля полюсов образуют крутые сколы разной кинематики СВ и СЗ простираения. Для части максимумов (рис. 10) кинематика трещин не была убедительно установлена, и они вынужденно были исключены из анализа.

Хорошо проявлены группы сколов с левосдвиговой кинематикой, очень близкие по ориентировке и типу смещения к трещинам в нуммулитовых известняках, так же образующие парагенез широтной зоны левого сдвига (рис. 10, *г*).

Трещины, кинематика которых отлична от выраженных в эоценовых известняках, вынесены на рис. 10, *д*. Чтобы разобраться в стрессовых условиях их возникновения, приходится предполагать, что структуры одного парагенеза с большей вероятностью будут наблюдаться в одной точке наблюдения. Так, трещины с левосдвиговым (СЗ простираения) и с правосдвиговым смещениями (СВ простираения) согласно модели Кулона–Андерсона образуют парагенез с субширотной осью сжатия (рис. 10, *е*). Широтные субвертикальные отрывы и сбросы, не

связанные с боковым отпором, могут входить в этот же парагенез или маркировать обстановки меридионального растяжения — широтного сжатия. Пара групп сколов СЗ простираения с правосдвиговыми смещениями образуют Y- и R-сколы парагенеза правого сдвига с ССВ сжатием (рис. 10, *ж*). В условиях субдолготного сжатия мог быть сформирован парагенез трещин право- и левосдвиговой кинематики; в этих же условиях или при СВ сжатии могли возникнуть и отрывы СВ простираения (рис. 10, *и*). Другие группы трещин менее надежно объединяются в парагенезы. Широтная (R-сколы) и две группы сколов СЗ простираения (Y- и R-сколы), с левосдвиговыми смещениями могут являться структурами зоны левого сдвига СЗ простираения, в условиях СВ сжатия (рис. 10, *з*). А присутствие долготных вертикальных отрывов (рис. 10, *е*) предполагает существование обстановок широтного растяжения — меридионального сжатия.

Система трещин, построенная программой Move (рис. 8 *а*, врезка) для условий формирования моноклинали и периклинального разворота слоев, к сожалению, не имеет кинематической интерпретации трещин. Малоамплитудные максимумы наклонных трещин СЗ и ЮВ падений соответствуют по положению паре кулоновских сколов условий ССЗ сжатия. Сравнение положения полюсов трещин смоделированной системы с замеренными в нуммулитовых известняках дает правосдвиговую кинематику субвертикальных сколов СЗ простираения. Интенсивный максимум вертикальных долготных трещин не имеет точного аналога среди трещин в эоценовых известняках; для наиболее близких по ориентировке кинематика не определена, но в датских известняках им соответствует максимум группы отрывов. Если эти трещины рассматривать как парагенез, то они так же могут быть результатом меридионального или субмеридионального сжатия.

При сравнении трещиноватости палеоценовых и эоценовых известняков очевидны сходные группы трещин. Это, в первую очередь, структуры модели

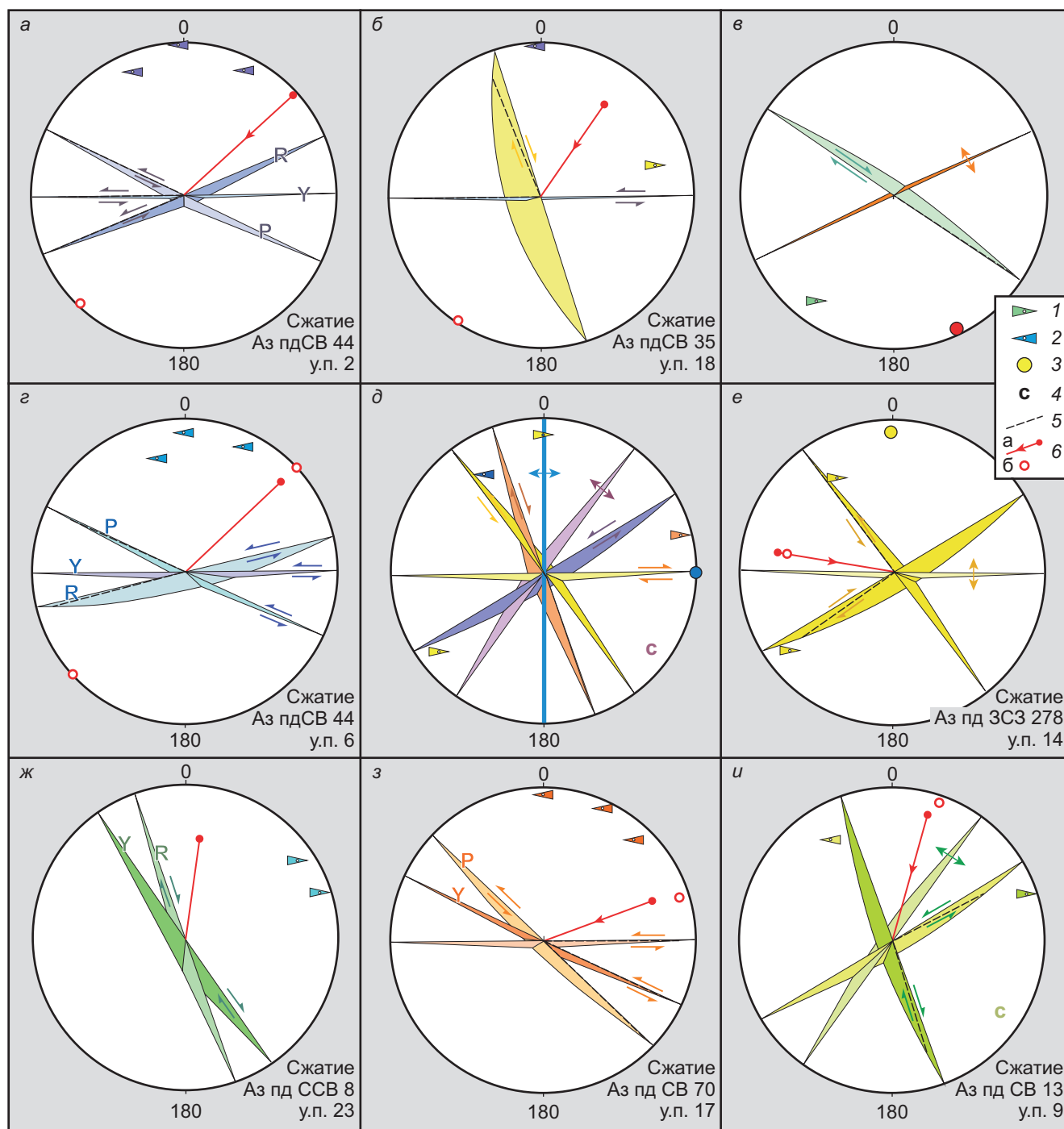


Рис. 10. Реконструируемые поля напряжений по трещинам в нуммулитовых известняках верхнего ипра — лютета (а–в) и палеоценовых породах (г–и). Полюса трещин (1–4): сколы с правдвиговой (1) и левдвиговой (2) кинематикой, 3 — отрывы, 4 — сколы со сбросовой кинематикой; 5 — ориентировка тектонической штриховки; 6 — положение оси главного сжатия, восстановленное по положениям плоскостей трещин (а) и с учетом положения штриховки (б). Стрелки отражают кинематику трещин

Риделя широтной зоны левого сдвига обстановок СВ сжатия. Многочисленные широтные Y-сколы ориентированы параллельно участку ущелья р. Чурюк-Су и логично считать, что долина проработана именно по зоне левого сдвига. Выраженность этих трещин в обоих компетентных интервалах свидетельствует о послелютетском времени их формирования.

Большее количество групп трещин и их разнообразие в палеоценовых породах связано, прежде всего, с большим количеством фаз деформаций,

проявившихся после их накопления. В меньшей степени влияние могла оказывать и толщина нижнеипрских глин между компетентными толщами, частично “гасившая” передачу напряжений верхней толще. Парагенезы широтного — субширотного сжатия есть в палеоценовых отложениях, но не проявлены в эоценовых известняках, т.е. такие напряжения могли отвечать стрессовому режиму долины раннеэоценового этапа деформаций в Горном Крыму [Никишин и др., 2006; Лыгина и др., 2019,

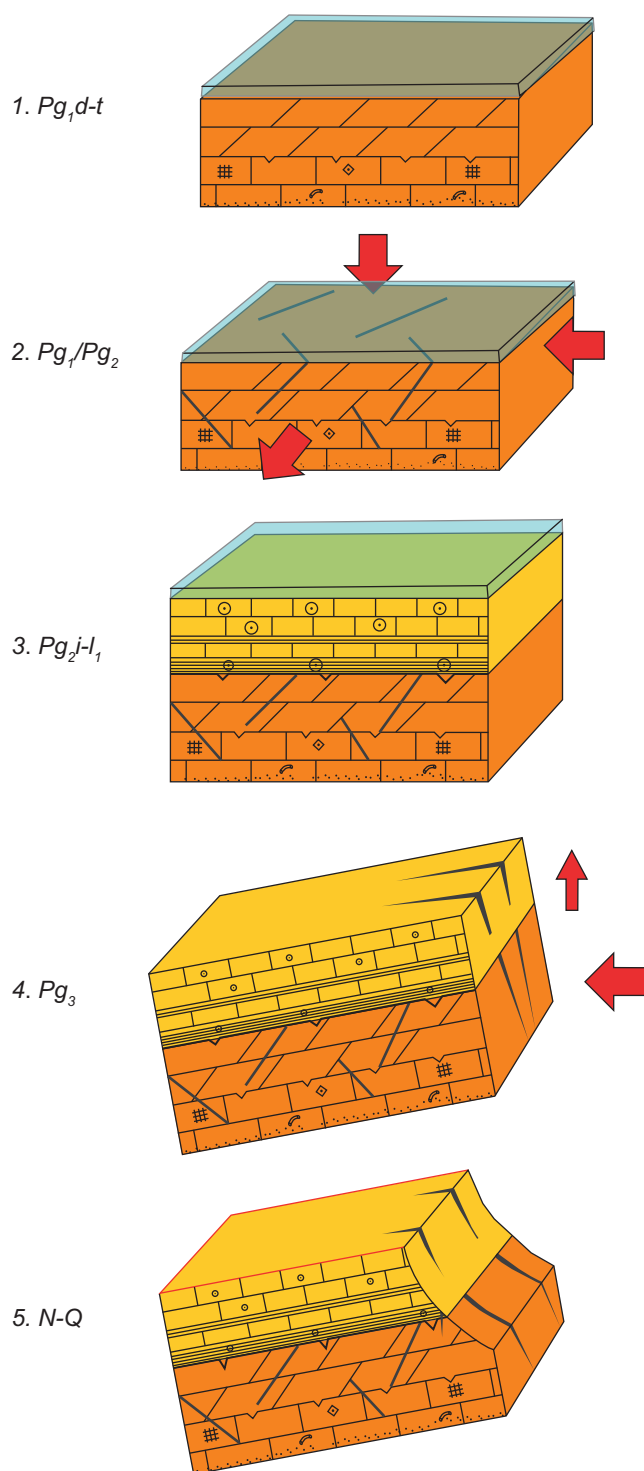


Рис. 11. Общая модель формирования трещиноватости разреза г. Сувлу-Кая

2022]. Сходные ориентировки напряжений для предсреднеэоценового этапа реконструированы в районе Белогорска [Лыгина и др., 2019], а в трещиноватости пород верхнего мела близ Чуфут-Кале [Фокин, 2023] обстановки субширотного сжатия проявились ранее, чем меридионального или северо-западного.

Предыдущими исследованиями [Курдин, Тверитинова, 1997; Вольфман, 2015; Курдин и др., 2017] определено доминирование меридиональных и СЗ напряжений сжатия на новейшем тектоническом этапе развития Крыма в целом и Горного Крыма

в частности. Однако в данном районе следы этих напряжений проявлены слабо; самыми значимыми становятся трещинные парагенезы с СВ ориентировкой оси главного сжатия. Для объяснения этого явления обратимся к разломной структуре фундамента ближних окрестностей Бахчисарая. Самым крупным разломом этого района является Бодракский разлом СВ простирания, разделяющий Горнокрымскую и Лозовскую структурные зоны фундамента. Смещения по нему устанавливаются для конца ранней и для средней юры и в кайнозое [Никишин и др., 2006]. Разлом обнажается северо-восточнее Бахчисарая, в районе с. Трудлюбовка, а на юго-запад по простиранию предположительно трассируется под меловыми отложениями в овраг. Кичик-Ашлама-Дере, а затем с плавным разворотом принимает широтную ориентировку, уходя в долину р. Чурюк-Су (рис. 1). Взбросо-левосдвиговые смещения по разлому на северо-востоке косвенно подтверждаются приразломными деформациями и по аналогии с левосдвиговыми смещениями разломов СВ простирания [Фокин, 2023]. Такие смещения у разлома СВ простирания будут реализовываться при сжатии в северных румбах.

На изгибе левого сдвига от северо-восточного простирания к широтному, субмеридиональное сжатие должно привести к возникновению транспрессии, с локальной переориентировкой сжатия на северо-восточное, которое в основном и зафиксировалось в трещиноватости компетентных палеогеновых пород в районе Бахчисарая.

Выводы. Проведенное моделирование и изучение реальной тектонической трещиноватости пород на СВ окраине Бахчисарая привели к следующим результатам и выводам.

I. Впервые выполнено трехмерное геомеханическое моделирование трещиноватости палеогеновых карбонатных толщ на стадии образования моноклиальной структуры в районе г. Сувлу-Кая. Модельная система дизъюнктивов только отчасти соответствует реальной, но ее формирование может быть описано ситуацией меридионального — северо-северо-западного сжатия — доминирующего стрессового режима для Горного Крыма на новейшем тектоническом этапе [Курдин, Тверитинова, 1997 и др.].

II. В замеренной трещиноватости палеоэоценовых и эоценовых карбонатных пород запечатлелись этапы деформаций с разной ориентировкой главного сжатия. Восстановлены поля доминировавших напряжений по замерам трещин.

III. Составлена принципиальная схема развития изученного региона (рис. 11) в палеоцене — квартере. Она включает в себя следующие этапы.

1. Даний — танет. Формирование известняков и мергелей.

2. Граница палеоцен/эоцен. Первый этап деформаций. Региональное сжатие параллелизуется с началом складчатости в Турции [Лыгина и др., 2019; 2022], но преобладающее сжатие ориентировано

субширотно. Это связано с передачей напряжений сжатия из области Большого Кавказа с участием механизма транспрессии [Фокин, 2023].

3. Ипр — ранний лютет. Накопление карбонатных глин и нуммулитовых известняков.

4. а) Оligocen — квартал. Второй, главный этап деформаций. Формирование моноклиальной структуры, связанное с ростом Качинского поднятия [Никишин и др., 2006]. Ранее возникшие дизъюнктивы в палеоценовых карбонатах реактивируются в условиях субмеридионального и северо-восточного сжатия. Первое повсеместно проявлено в Крымско-Кавказском регионе [Курдин и др., 2017]. Второе связано с механизмом локальной транс-

прессии вследствие левосдвиговых смещений по Бодракскому разлому. Системы трещин этого этапа в эоценовых и палеоценовых известняках образовывались в едином поле напряжения, но отдельно, из-за разделяющей их демпферной толщи глин.

б) Плиоцен — квартал. Продолжение формирования моноклинали и развитие систем трещин. Выработка современного рельефа.

Благодарности. Работа выполнена с использованием материалов ЦКП «Геопортал» МГУ имени М.В. Ломоносова. Авторы благодарят Midland Valley Exploration Ltd. за возможность использовать программное обеспечение Move в учебных и научных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вольфман Ю.М. Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма // Геофизический журнал. 2015. Т. 37, № 1. С. 100–120.

Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма (стратиграфия кайнозоя, магматические, метаморфические и метасоматические образования): Учебное пособие / Под ред. О.А. Мазаровича, В.С. Милеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 160 с.

Зернецький Б.Ф., Рябоконь Т.С., Люльева С.А. Питання вивчення осадового комплексу палеоцену Кримського і Керченського півостровів // Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України Т. 7. 2014. С. 101–125.

Курдин Н.Н., Никитин М.Ю., Тверитинова Т.Ю. Разрывные нарушения мел-кайнозойского комплекса чехла Качинского антиклинория юго-западного Крыма // Полевые практики в системе высшего образования: Материалы 5-й Всероссийской конференции. СПб.: ООО «Изд-во ВВМ», 2017. С. 163–165.

Курдин Н.Н., Тверитинова Т.Ю. Тектодинамические условия формирования альпийской структуры Качинского поднятия Горного Крыма // Очерки геологии Крыма. Труды Крымского геологического научно-учебного центра им. проф. А.А. Богданова. Вып. 1. М.: Изд-во геол. ф-та МГУ, 1997. С. 131–151.

Лыгина Е.А., Никишин А.М., Тверитинова Т.Ю. и др. Эоценовые палеосейсмодислокации горы Ак-Кая (Белогорский район, Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 44–54.

Лыгина Е.А., Правикова Н.В., Чижова Е.Р. и др. Эоценовая сейсмичность и палеогеография Центрального Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 68–77.

Муратов М.В. Руководство по учебной геологической практике в Крыму. Т. 2. Геология Крымского полуострова. М.: Недра, 1973. 192 с.

Никишин А.М., Алексеев А.С., Барабошкин Е.Ю. и др. Геологическая история Бахчисарайского района Крыма (учебное пособие по Крымской практике). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 60 с.

Семененко В.Н. Верхнемиоценовые молассы Альминского прогиба // Геологический журнал. 2003. № 2. С. 31–58.

Фокин П.А. Системы дизъюнктивных нарушений в верхнемеловых породах на северо-восточном склоне плато Чуфут-Кале (Бахчисарайский р-н, Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 22–30.

Nikishin A.M., Okay A., Tüysüz O., et al. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. P. 2: Tectonic history and paleogeography // Marine and Petroleum Geology. 2014. P. 1–15.

Wang Y., Xiong Y., Xu K. A Mass-Spring model for surface mesh deformation based on shape matching: Proceedings of ACM Graphite. Kuala Lumpur, 2006. P. 376–380.

<http://www.mve.com/>

Статья поступила в редакцию 11.11.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024