

УДК 551.243 – 244 (477.8)

А. МУРОВСКАЯ<sup>1</sup>, Ж.-К. ИПОЛИТ<sup>2</sup>, Е. ШЕРЕМЕТ<sup>1-4</sup>, Т. ЕГОРОВА<sup>1</sup>,  
Ю. ВОЛЬФМАН<sup>3</sup>, К. КОЛЕСНИКОВА<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт геофизики НАН Украины, ул. Палладина, 32, Киев, Украина, 03680, тел. +38(066)2255285, эл. почта: murovskaya@gmail.com<sup>2</sup>Университет Аикс-Марсель, GEREGE UMR 34 CNRS-IRD, BP 80, Аикс-эн-Прованс, Франция, 13545<sup>3</sup>Институт геофизики НАН Украины, ул. Гагарина 20, Симферополь, Украина, 95026<sup>4</sup>Университет Ницца–София–Антиполис, CNRS, OCA-UMR Геоазур, Вальбонн, Франция, 06560

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ И ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА В КОНТЕКСТЕ ЭВОЛЮЦИИ ЗАПАДНО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА

**Цель.** Изучить деформации мезоуровня (зеркала скольжения, трещины, складки) в породных комплексах разного возраста, восстановить соответствующие им поля напряжений. Сравнить результаты с предыдущими тектонофизическими данными, сейсмическими разрезами и механизмами очагов землетрясений Крымско-Кавказской сейсмогенной зоны, проанализировав их в контексте тектонической эволюции Западно-Черноморского бассейна. Определить тектонические этапы, уточнив возраст деформаций. **Методика.** Деформации рассматривались в двух разновозрастных осадочных комплексах. В отложениях нижнего мела, а также на контакте пород нижнего мела и верхней юры исследовались конседиментационные разрывные нарушения и деформации. Вторая группа объектов изучалась на обнажениях относительно молодого верхнемелового–неогенового осадочного комплекса. Для обработки зеркал скольжения применялся кинематический метод и программа Win Tensor [Devlaux, Sperner, 2003], а для построения стереограмм программа Stereo 32 К. Руллера та К. Трепманн. **Результаты** анализа позволяют выделить, по меньшей мере, два генерализованных этапа в тектонической эволюции Юго-Западного Крыма. *Этап растяжения* в раннем мелу подтверждается тектоническими зеркалами сбросового типа с сохранившимися древними бороздами скольжения, тектонической брекчией и следами морских прикрепленных организмов. Азимут простирания зеркал 250–320°. Соответствующие им поля напряжений характеризуются С-Ю, СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ ориентацией оси растяжения. Согласно новым стратиграфическим и структурно-геологическим данным, можно сделать вывод, что сбросообразование началось с валанжина–баррема и связано с раскрытием в раннем мелу Западно-Черноморского бассейна [Hippolite et al., 2014, Sheremet et al., 2014]. Переинтерпретация сейсмического профиля ГСЗ 25, пересекающего западную часть Черного моря в субмеридиональном направлении, показала широтный высокоамплитудный сброс вдоль континентального склона, по которому происходило раскрытие Западно-Черноморской впадины в результате рифтогенеза [Yegorova et al., 2010; Баранова и др. 2008]. Этот разлом расположен на западном продолжении серии сбросов нижнемелового возраста, выявленных в Юго-Западном Крыму, и может иметь раннемеловой возраст. *Этапы сжатия* фиксируются в верхнемеловых–неогеновых породах надвиговыми и сдвиговыми структурами и относятся к палеоцену–раннему миоцену. Соответствующие им поля напряжений характеризуются несколькими направлениями ориентации оси сжатия. В западной части изученной территории преобладает ЮЗ сжатие, а для центральной и восточной частей характерно сжатие в С-Ю и СЗ-ЮВ направлениях. На некоторых обнажениях верхнеюрского–нижнемелового осадочного комплекса зафиксированы сдвиги и взбросы, для которых восстановлена С-Ю и СЗ-ЮВ ориентация оси сжатия. Соответственно, некоторые разрывы, ранее изученные в породах таврической серии, средней юры–нижнего мела, могли активизироваться в период кайнозойского сжатия. Этапы кайнозойского сжатия четко выделяются на сейсмических разрезах ОГТ, фиксирующих надвиги и принадвиговые складки. Полевые данные указывают и на сжатие в породах миоцена, но эти деформации по масштабу меньше, чем в период палеоцена–раннего эоцена и позднего эоцена–олигоцена. Современное сжатие широтного и меридионального направлений определяется на основе анализа 26 механизмов очагов землетрясений. В то же время семь механизмов указывают на растяжение, как и ряд молодых активизированных сбросов. По ориентации восстановленных осей напряжений можно сделать вывод, что деформации сжатия обусловлены давлением со стороны Черноморской микроплиты на Горный Крым, а современные сбросы связаны с углублением Черноморской впадины и денудацией Крымского орогена. **Научная новизна.** Деформации мезоуровня в верхнемеловых–неогеновых породах описаны впервые. Полученное для них поле сжатия свидетельствует о проявлении кайнозойских деформаций на изученной территории. Тектонические зеркала сбросового типа впервые рассмотрены в контексте раскрытия Западно-Черноморской впадины. Уточнены возрастные границы этапов деформации для породных комплексов Юго-Западного Крыма. **Практическое значение.** Информация о напряженно-деформированном состоянии Юго-Западного Крыма необходима для прогнозирования негативных экзо- и эндогенных геологических процессов: землетрясений, оползней и других катастрофических явлений. Уточнение геодинамической модели необходимо для дальнейших сейсмопрогностических, инженерно-геологических исследований и составления различного рода картографических документов.

**Ключевые слова:** Юго-Западный Крым; зеркало скольжения; растяжение; сжатие; Западно-Черноморский бассейн; эволюция полей напряжений.

**Введение**

Крымские горы являются северной частью Альпийского складчатого пояса. В структурно-геологическом отношении многие исследователи относят их к северо-западной пассивной окраине восточной части Черноморской микроплиты (ЧМП). Геологическое развитие Горного Крыма (ГК) связано с формированием Большого Кавказа (БК), на северо-западном продолжении которого он находится. Поэтому в ГК должны сохраниться признаки тектонических событий, связанных с раскрытием Черноморской впадины (ЧВ) и кайнозойской фазой сжатия БК вследствие перемещения на север и северо-запад Аравийской плиты и ЧМП [Афанасенков и др., 2007].

Несмотря на многолетнюю историю геофизических и геологических исследований Черного моря и ГК, существует ряд нерешенных вопросов.

Один из наиболее существенных связан со временем и характером раскрытия ЧВ. В работах [Zonenshain, Le Pichon, 1986; Finetti et al., 1988; Robinson et al., 1996;] говорится о «медленном» раскрытии ЧВ в промежутке времени от раннего мела до палеоцена. О. Хрящевская с соавторами [Khriachtchevskaya et al., 2010] пришли к выводу об аптско-сантонском периоде рифтогенеза в Черном море. На основании интерпретации новых сейсмических профилей большой глубинности А. М. Никишин [Никишин, 2014] относит период континентального рифтогенеза к позднему баррему – альбу, а время раскрытия черноморских глубоководных впадин с субокеанической корой связывает с сеноманом – средним сантоном.

Данные наземных геологических исследований в Западных Понтидах [Hippolyte et al., 2010] и на БК [Nikishin et al., 2003] свидетельствуют о наличии нижнемеловых структур растяжения на континентальных окраинах Черного моря. Эти структуры могут быть связаны и нести информацию о его раскрытии.

Следующий спорный вопрос касается геологических структур ГК и времени их формирования. Разные исследователи занимают крайние точки зрения, доказывая доминирование или наоборот – практическое отсутствие складчато-надвиговых деформаций для альпийского этапа развития ГК [Муровская и др., 2014]. Но даже для достоверно установленных складчато-надвиговых структур возраст их формирования остаётся открытым. Эти деформации сжатия развиты преимущественно в пределах Главной гряды Крымских гор, где самые древние отложения, по крайней мере в Восточном Крыму, относятся к нижнему мелу [Sheremet et al., 2014]. Следовательно, обнаруженные в них деформации не старше этого возраста, но могут быть сколь угодно молодыми.

В последние десятилетия высказывается предположение, что самыми масштабными деформациями в ГК являются позднеальпийские. Например, по В. В. Юдину [Юдин, 2009, 2011], Подгорный и Южнобережный меланжи, прослеженные им в основании обрывов Главной Гряды и вдоль береговой линии Черного моря, являются активными структурами неоген-четвертичного возраста.

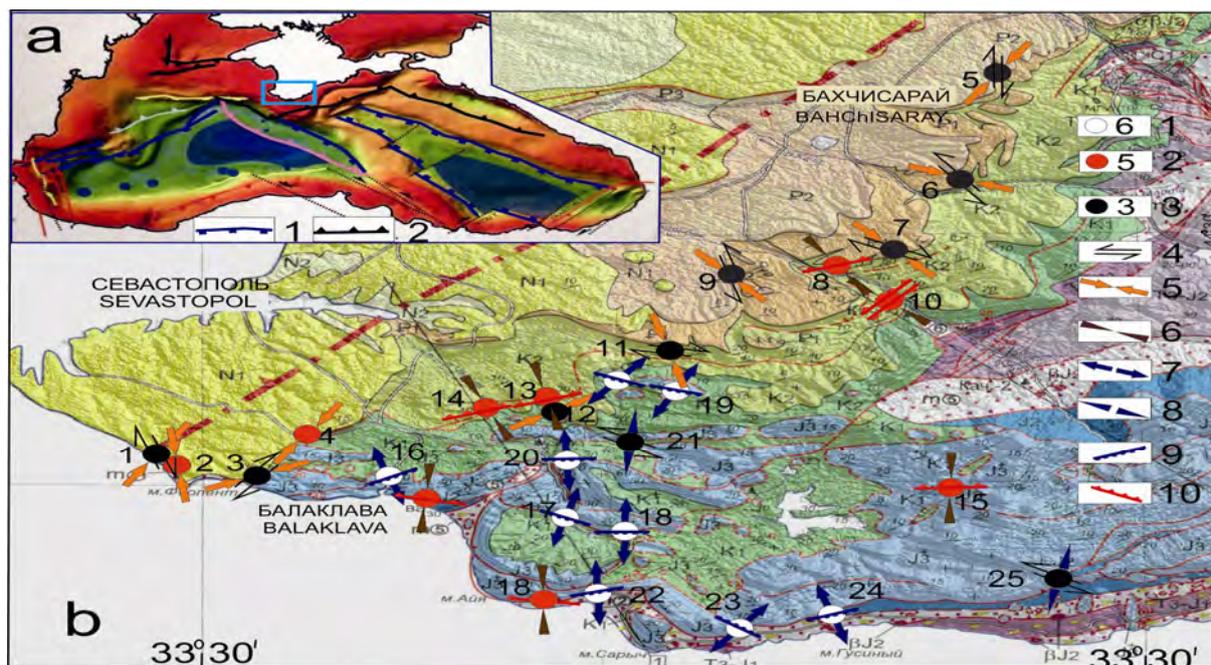
**Цель работы**

Изучить деформации мезоуровня (зеркала скольжения, трещины, складки) в породных комплексах разного возраста, восстановить соответствующие им поля напряжений. Сравнить результаты с предыдущими тектонофизическими данными, сейсмическими разрезами и механизмами очагов землетрясений Крымско-Кавказской сейсмогенной зоны, проанализировав их в контексте тектонической эволюции Западно-Черноморского бассейна. Определить тектонические этапы, уточнив возраст деформаций.

С целью уточнения возрастных границ деформаций и восстановления последовательности тектонических этапов и фаз сжатия–растяжения в Юго-Западном Крым (ЮЗК) были проведены полевые тектонофизические и геолого-структурные работы с одновременным отбором образцов для микропалеонтологического анализа.

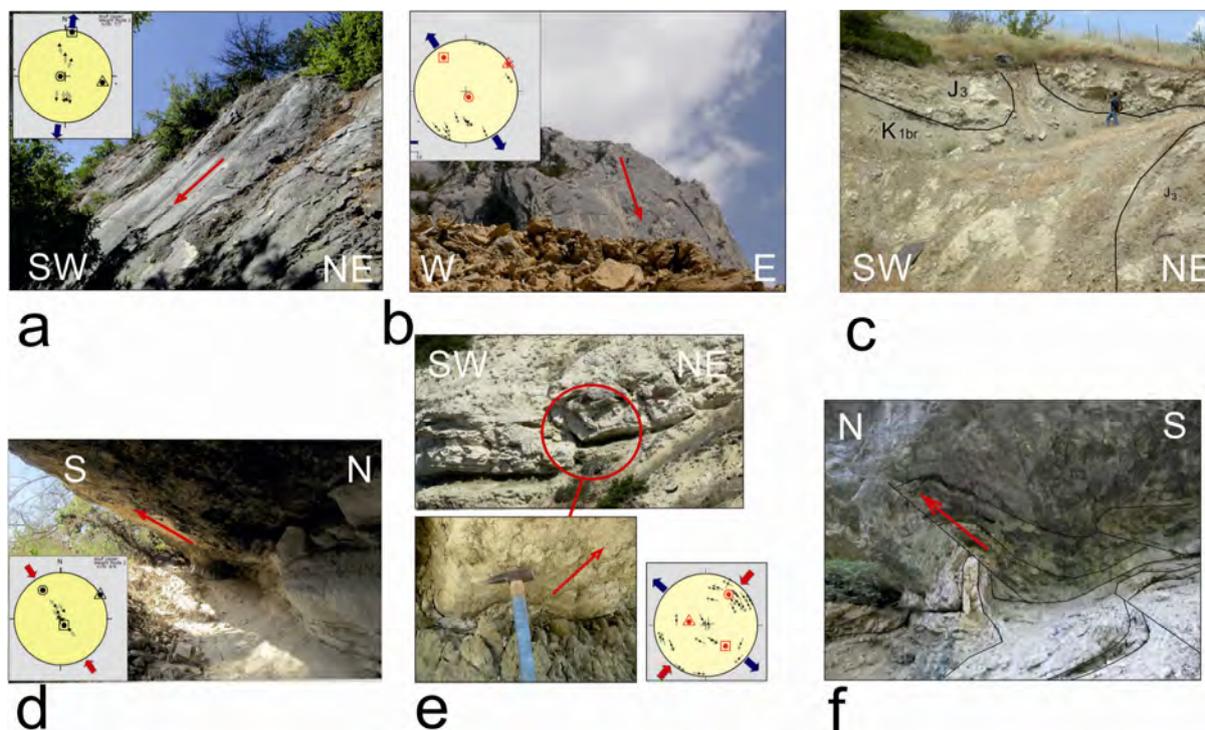
**Методика**

Предшествующими тектонофизическими работами подавляющее большинство зеркал скольжения было изучено в породах возрастного диапазона от позднего триаса до раннего мела [Saintot, 1999; Гинтов, 2005; Гончар, 2006; Муровская, 2012, Вольфман, 2014]. Поэтому для уточнения временных этапов деформаций настоящие исследования проводились в двух разновозрастных осадочных комплексах. В более древнем рассматривались конседиментационные разрывные нарушения в отложениях нижнего мела, а также на контакте пород нижнего мела и верхней юры. Вторая группа обнажений изучалась в пределах развития относительно молодых вернемеловых-неогеновых пород. (рис. 1). При полевых работах использовался весь арсенал геолого-структурных и тектонофизических методов. Изучались разнообразие структурные элементы: контакты породных комплексов, поверхности напластования, парагенезисы трещин, тектонические зеркала с бороздами скольжения, складчатые деформации и др. Обработка и интерпретация зеркал скольжения и механизмов очагов землетрясений осуществлялась кинематическим методом с применением программы Win Tensor [Devlaux, Sperner, 2003]. Проводилось предварительное, основанное на полевых наблюдениях, разделение зеркал скольжения на разные группы с преобладанием сдвиговой, взбросовой или сбросовой компонент перемещения. Для построения стереограмм применялась программа Stereo 32 К. Руллера и К. Трепманн. Построение полюсов тектонических зеркал и осей главных нормальных напряжений выполнялось на проекции верхней полусферы (т. н. сетке Вульфа). Предшествующие тектонофизические замеры по 2256 зеркалам скольжения были сопоставлены с новыми данными и обобщены в контексте поставленных задач. При построении возрастной шкалы деформаций учитывались новые определения возраста пород, выполненные на основе анализа микропалеонтологических комплексов (nannofossil assemblages) [Hippolyte et al., 2014].



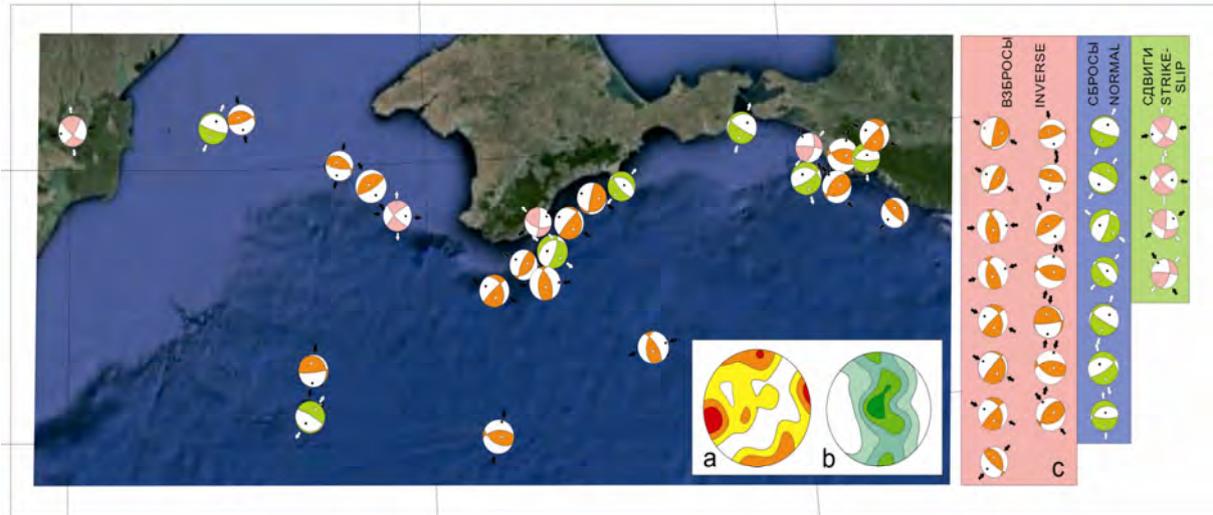
**Рис. 1.** Геологическая карта Горного Крыма [Юдин, 2009] с пунктами наблюдений: **а** – положение района работ на фоне гипсометрии фундамента ЧМ [Каумаксі, 2014]: 1 – сбросы, ответственные за раскрытие ЧМ; 2 – активные надвижки; **б** – обнажения, на которых зафиксированы зеркала скольжения: 1 – сбросового; 2 – надвигового; 3 – сдвигового типов; 4 – направление сдвига; Положение оси сжатия для: 5 – сдвигов; 6 – надвигов; Положение оси растяжения для: 7 – сбросов; 8 – сбросо-сдвигов; ориентировка зеркал скольжения: 9 – сбросового, 10 – надвигового типов

**Fig. 1.** Geological map of the Crimea Mountains [Yudin, 2009] with points of observations; **a** – location of the study area on the hypsometrical background of the Black Sea [Kaymakci, 2014]: 1 – Normal faults related to opening of BC; 2 – Active thrust faults; **b** – outcrops with slickensides of: 1 – normal; 2 – thrust; 3 – strike-slip types; 4 – the direction of the strike-slips; The orientation of compressional axis for: 5 – strike-slips; 6 – thrusts; The orientation of extension axis for: 7 – normal; 8 – normal and strike-slips; The orientation of the slickensides of: 9 – normal; 10 – thrust types



**Рис. 2.** Примеры деформационных структур, связанных с: **a, b, c** – растяжением; **d, e, f** – сжатием. Красная стрелка показывает направление перемещения висячего крыла

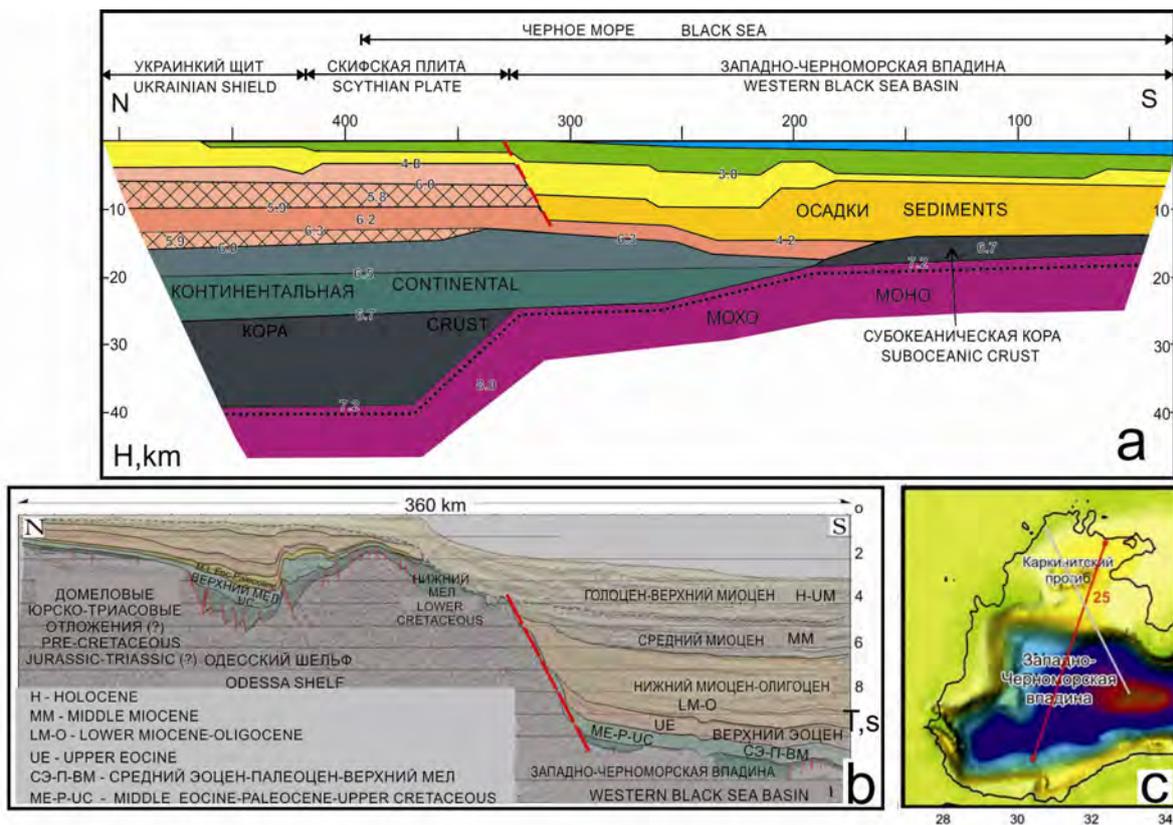
**Fig. 2.** Examples of deformational structures related to: **a, b, c** – extension; **d, e, f** – compression. The red arrow indicates the direction of movement of the hanging wall



**Рис. 6.** Эпицентры и фокальные механизмы землетрясений Крымско-Кавказской сейсмогенной зоны:

на стереограммах обобщены ориентировки главных осей напряжения в очагах: а – сжатия; б – растяжения; с – механизмы разделены на взбросовый, сбросовый и сдвиговый типы

**Fig. 6.** The earthquake epicenters and focal mechanisms of Crimean-Caucasian seismicogenic zone: the stereograms generalize the orientation of the main axis of stress in the focal mechanisms: a – compression; b – extension. c – focal mechanisms separated into inverse, normal and strike-slip types



**Рис. 7.** Скоростной разрез по профилю ГСЗ 25 (а) и сейсмический разрез ОГТ (б):

[Yegorova et al., 2010; Baranova et dr., 2008; Khriachtchevskaya et al. 2010], иллюстрируют сброс рифтогенной природы (красный пунктир) на краю континентального шельфа ЧМ. Цифры на (а) отмечают значения сейсмических скоростей в км/с. Положение профилей показано на фоне гипсометрии фундамента (с)

**Fig. 7.** The velocity section along the profile DSS 25 (a) and seismic profile CDP (b):

[Yegorova et al., 2010; Baranova et al., 2008; Khriachtchevskaya et al. 2010] which illustrate the normal fault of rift genesis (red dashed line) on the margin of the continental shelf of the BC. The numbers on (a) mark the values of the seismic velocities in km/s. The location of the sections is shown on the hypsometrical fundament (c)

### Основные стратиграфические комплексы

Основание Крымских гор составляют отложения *таврической серии*, возраст которой традиционно считается поздне триасово–раннеюрским [Муратов, 1960; Афанасенков и др., 2007]. Таврический флиш представляет собой последовательность мощных и сильно деформированных глинистых сланцев с прослоями алевролитов.

В районе Главной гряды Крымских гор таврический флиш перекрывается флишовой толщей *средней юры*, в которой доминирует песчаная составляющая. Порода таврики и средней юры часто содержат в себе следы активного магматизма (дайки, батолиты, лакколлиты), проявившегося в ЮЗК в байос–батское время.

*Верхнеюрские отложения* характеризуются изменениями фациального состава по латерали: известняки, конгломераты, мергели [Муратов, 1960; Афанасенков и др., 2007]. Титон–берриасские известняковые массивы сложены плотными рифогенными породами. Они несогласно залегают на более древних флишовой породах, бронируя вершины Главной гряды Крымских гор.

*Нижнемеловые отложения* представлены всеми ярусами и имеют преимущественно терригенный состав. В северной части КГ отложения нижнего мела, полого наклоненные на северо-запад, с угловым несогласием перекрывают породы таврики (с. Прохладное) или вулканиты средней юры (с. Трудолюбовка). В юго-западной части Крымских гор нижнемеловые песчано-глинистые отложения выполняют долины (Байдарскую, Варнаутскую, Балаклавскую и др.), окруженные грядами верхнеюрских известняков и конгломератов.

Для разреза нижнего мела характерно присутствие конгломератов и олистостром.

В альбе в составе нижнемеловых отложений появляются вулканогенно-осадочные породы. В районе г. Балаклава альбские вулканокластовые песчаники, переслаивающиеся с мергелями, несогласно залегают на титон–берриасских известняках.

*Верхнемеловые отложения* в ЮЗК представлены, в основном, мергелями, песчанистыми мергелями и известняками. Они с незначительным несогласием залегают на породах верхнего альба. Сеноман–кампанские породы содержат вулканический пепел.

*Отложения палеоцена* представлены мшанковыми известняками и достигают своей наибольшей мощности в западной части Внутренней гряды Горного Крыма (г. Инкерман). К востоку они постепенно выклиниваются и в районе г. Симферополь уже не выходят на дневную поверхность.

*Среднеэоценовые массивные нумуллитовые известняки* несогласно залегают на породах от палеоцена до нижнего мела.

Отложения *олигоцен-раннего миоцена* (т.н. Майкопская серия) полностью выпадают из разреза ЮЗК.

Обломочные известняки и песчаники *среднего и верхнего миоцена* несогласно залегают на отложениях от средней юры до верхнего эоцена.

Осадки *меотиса* завершают разрез морских отложений ЮЗК.

Начиная со *среднего плиоцена*, в предгорьях Крыма формируются континентальные обломочные отложения [Муратов, 1960].

Для целей нашего исследования представляются важными выводы, которые следуют из обзора основных стратиграфических комплексов:

1. Для раннего мела характерно наличие контрастного рельефа, о чем свидетельствует развитие грубообломочных терригенных пород, а также существенные смены мощностей и фаций отложений на незначительных расстояниях. Некоторые авторы [Муратов, 1960; Юдин, 2011] говорят о глобальной перестройке структурного плана в этот период.

2. В раннем мелу активизируются тектонические процессы, о чем свидетельствует появление в разрезе олистостром и вулканических пород.

3. Для позднего мела и начала палеоцена характерны достаточно стабильные условия осадконакопления.

4. Предсреднеэоценовое и предсреднемиоценовое угловые несогласия отмечают изменение тектонических режимов в соответствующие периоды.

### Результаты

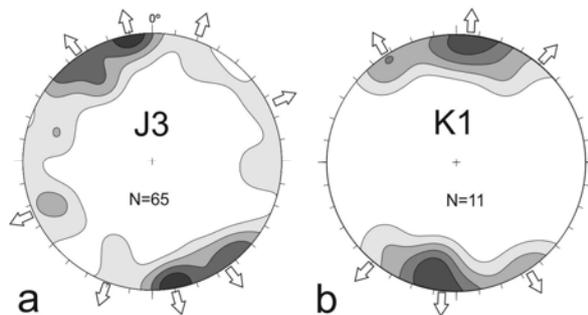
**Структуры растяжения в верхнеюрских–нижнемеловых породах.** На изученных обнажениях мы убедились, что раннемеловые породы, как правило, имеют стратиграфические контакты с более древними отложениями. Эти контакты бывают четырех типов: края олистолитов, края олистостром, эродированные плоскости сбросов и выполнение понижений в эрозионном рельефе. В шести пунктах (п.), на контакте верхнеюрских известняков и нижнемеловых песчанисто-глинистых обнажений изучены тектонические зеркала сбросового типа с древними сохранившимися бороздами скольжения, тектонической брекчией и следами морских прикрепленных организмов (рис. 2, а, 2, б). Зеркала простираются в диапазоне азимутов 250–320°. Соответствующие им поля напряжений характеризуются С-Ю, СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ ориентировкой действующей оси растяжения. Самое крупное из зеркал – п. 17 (рис. 2, а) ограничивает с севера Варнаутскую долину, сложенную нижнемеловыми песчано-глинистыми отложениями. На обнажениях 21 и 25 описаны крупные тектонические зеркала сдвигового типа с незначительной сбросовой компонентой перемещения, для которых также восстановлена С-Ю ориентировка оси растяжения. Оба зеркала находятся в зоне Чернореченского разлома, активизированного и в настоящее время.

Огромные плоскости сдвигового и сбросового типов ограничивают с юга Главную гряду ГК.

Одна из них (п. 24) показана на рис. 2, *b*. Зеркало находится на контакте титон-берриасских рифогенных известняков и флиша, традиционно считающегося нижнеюрским.

Вертикальные движения в раннем мелу, связанные с формированием отдельных грабенов, подтверждаются присутствием блоков (олистолитов) верхнеюрских известняков в нижнемеловой олистостроме, матрикс которой представлен песчано-глинистыми отложениями. На рис. 2, *в* показана барремская (по новым определениям возраста) олистострома в районе г. Балаклава.

По предыдущим тектонофизическим данным [Гинтов, 2005; Вольфман; 2008, Муровская; 2012] для 65 обнажений ЮЗК, находящихся в поле развития верхнеюрских пород, обобщены ориентировки действовавших осей растяжения (рис. 3, *a*). На стереограмме выделяются три основных направления растяжения, которые совпадают с некоторыми ориентировками растяжения и для вновь изученных зеркал (рис. 3, *b*). Это позволяет заключить следующее:



**Рис. 3.** Ориентировка действующих осей растяжения, восстановленных кинематическим методом:

*a* – в отложениях J3; *b* – в отложениях K1; N – количество осей

**Fig. 3.** The orientation of active extensional axis reconstructed by kinematic method:

*a* – in the deposits of J3; *b* – in the deposits of K1; N – the amount of axis

1. Очевидно, часть разрывов, изученных ранее в более древних отложениях, также связана с раннемеловым режимом растяжения. В то же время, некоторые из них были реактивированы позже и активны в настоящее время [Муровская, 2012]. Это указывает на то, что сбросовый деформационный режим является унаследованным и проявлялся/проявляется в разные периоды времени.

2. Изученные сбросовые и сбросо-сдвиговые тектонические зеркала, фиксирующие режим растяжения, очевидно, связаны с раскрытием в раннем мелу Западно-Черноморского бассейна. Датировки по нанопланктону позволяют считать, что формирование сбросов началось, по меньшей мере, с валанжина-баррема [Hippolite et al., 2014; Sheremet et al., 2014].

**Структуры сжатия в верхнеюрских-неогеновых породах** подробно описаны в [Муровская и др., 2014], здесь мы остановимся на наиболее интересных из них. Деформации в отложениях *верхнего мела* изучены в пяти пунктах. На западной окраине с. Терновка в левом борту дороги на г. Бахчисарай (п.12) зафиксированы тектонические зеркала и описана лежащая складка. Для совокупности зеркал восстановлено поле сдвигового типа с ориентировкой оси сжатия ЮВ 161°. На юго-западной окраине с. Куйбышево на левом берегу р. Бельбек (п.10) в известняках верхнего мела измерены две группы тектонических зеркал СВ 50–70° простираения с пологим (30–50°) падением в обе стороны. Для всех разрывов однозначно идентифицированы надвиговые подвижки в поле взбросового типа с горизонтальным ЮВ 140° положением действующей оси сжатия.

На северной окраине с. Куйбышево (п. 8) в мергелях верхнего мела изучены 18 тектонических зеркал с простираением СЗ 290°, для которых реконструировано поле напряжения сдвигового типа с субгоризонтальной ЮВ 140° осью сжатия.

В обнажении 16 на северной окраине с. Черноречье об интенсивных деформациях в мергелях верхнего мела свидетельствует довольно крутое, под углом 40°, падение пластов и тектонические зеркала в плоскости напластования. Кинематическим методом реконструировано поле сдвигового типа с ЮЗ 250° положением оси сжатия.

Перемещение надвигового типа вдоль поверхности напластования в мергелях верхнего мела в п. 17 (рис. 2, *d*) произошло в поле субмеридионального сжатия.

На протяжении 100 м вдоль дороги на пос. Штурмовое (п. 18) обнажаются сильно деформированные верхнемеловые мергели. По форме принадвиговых складок восстановлено поле взбросового типа с ЮВ 150° положением оси сжатия.

Отложения *палеоцена* изучены в пунктах 5–8. На восточной окраине г. Бахчисарай (п. 5) в пределах зоны дробления субмеридионального простираения с многочисленными зеркалами скольжения сдвигового типа восстановлена ось сжатия, ориентированная в направлении ЮЗ 230°. Тектоническое нарушение пересекает палеоценовую и эоценовую гряды.

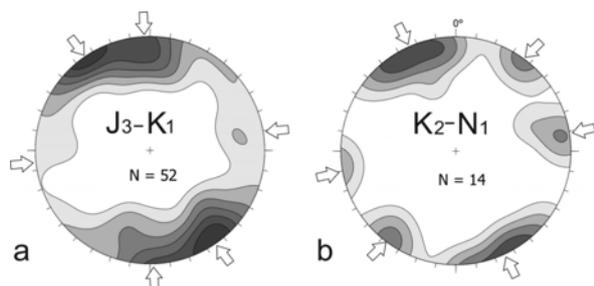
Все обнаруженные деформации *сарматских* отложений находятся в пределах Гераклеийского полуострова (п.п. 1–4). Для зоны тектонического нарушения с простираением 330° и крутым северо-восточным падением (п. 1) кинематическим методом реконструировано поле сдвигового типа с ЮЗ 250° положением оси сжатия. Зона и одно из субгоризонтальных зеркал скольжения в ее пределах показаны на рис. 2, *e*. В работе [Алехин, 2012] описаны деформации в разломной зоне северо-западного простираения в береговом обрыве Царского пляжа (п. 2) и реконструированы поля

сдвигового и взбросового типов с СЗ 330–350° ориентировкой осей сжатия.

В западном борту Мраморной балки (п. 3) сарматские обломочные известняки характеризуются крутым (угол 40–50°) падением напластования, в то время как в ненарушенном положении для них характерно субгоризонтальное залегание. Возможно, такая наклонная ориентировка слоев связана с северо-западным надвиганием пластины верхнеюрских известняков и их столкновением с сарматскими отложениями, в результате чего последние «задираются».

На протяжении одного километра вдоль шоссе Севастополь – Ялта (п. 4) фиксируется зона деформаций в отложениях миоцена и подстилающего нижнего мела, которая контролируется Георгиевским разломом [Иванов и др., 2009]. Для нее характерно крутое (до 80°) падение слоев, участки дробления, тектонические зеркала, флексурные перегибы. По тектоническим зеркалам в миоценовых? песчаниках получено поле сжатия ЮЗ 220° ориентировки.

При обобщении ориентировок осей сжатия (рис. 1, 4, *b*) видим, что направление сжатия ЮВ 140–160° наиболее ярко представлено на участке между п.п. 6 и 11. Перемещения в этом поле осуществлялись по разноориентированным разрывам. Преобладают сдвиги: в п.п. 7 и 11 – правые, а в п.п. 6 и 9 – левые; присутствуют взбросо-сдвиговые и надвиговые разрывы: п.п. 8, 10, 13, 14. Отдельные блоки, ограниченные правыми (п. 6) и левыми (п. 19) сдвигами, выдвигаются как клавиши. Во фронте «клавиш» образуются надвиговые деформации (п.п. 8, 10).



**Рис. 4.** Ориентировка действующих осей сжатия, восстановленных кинематическим методом:

*a* – в отложениях  $J_3-K_1$ ; *b* – в отложениях  $K_2-N_1$ ;  $N$  – количество осей

**Fig. 4.** The orientation of active compressional axis, reconstructed by kinematic method:

*a* – in the deposits of  $J_3-K_1$ ; *b* – in the deposits of  $K_2-N_1$ ;  $N$  – the amount of axis

Таким образом, тектонофизические данные, полученные в поле развития верхнемеловых-миоценовых отложений, показывают, что из 14 определений деформационных режимов преобладают сдвиговые (10 определений) и присутствуют взбросовые (4 определения).

Поля сжатия восстановлены и по деформациям в более древних отложениях ЮЗК [Saintot, 1999; Гинтов, 2005; Муровская, 2012]. Так, для 52 обнажений ЮЗК, находящихся в поле развития верхнеюрских-нижнемеловых пород, обобщены ориентировки действующих осей сжатия по предыдущим тектонофизическим данным (рис. 4, *a*). Отчетливо выделяются три основных направления, два из которых совпадают с сжатием, полученным для «молодых» зеркал. Соответственно, некоторые разрывы, ранее изученные в породах таврической серии, средней юры–нижнего мела, могли активизироваться или сформироваться в период кайнозойского сжатия.

На рис. 2, *f* в качестве примера структуры меридионального сжатия показан северовергентный надвиг в верхнеюрских известняках, наблюдаемый в правом борту р. Узунджа (п. 15). В работе [Гинтов, 2005] описан Балаклавский надвиг в верхнеюрских конгломератах, для которого реконструировано поле субмеридионального сжатия.

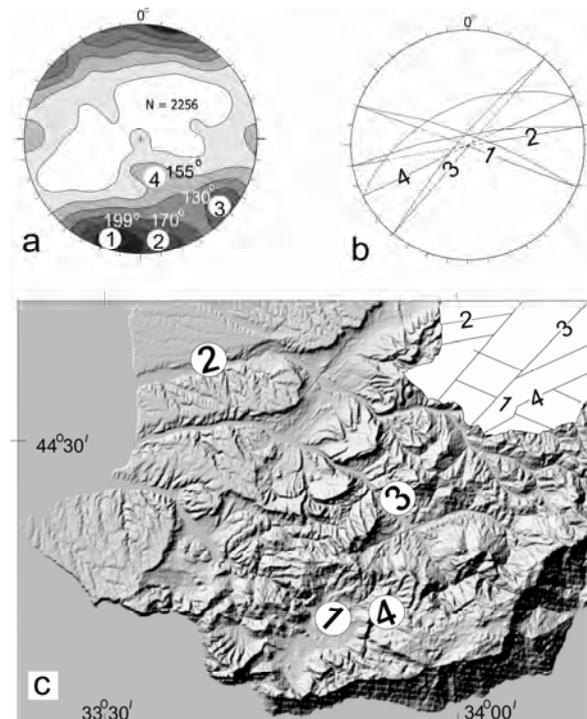
В западной части изученной территории на Гераклевском полуострове в сарматских известняках преобладают поля с ЮЗ-СВ до З-В положением оси сжатия (рис. 1). Ось сжатия ЗЮЗ-ВСВ 260° ориентировки реконструирована и для более древних отложений (рис. 4, *a*). Представляется, что такое направление компрессии обусловлено действием внешних сил с юго-запада. Это подтверждается ориентировкой активного надвигового фронта, расположенного вдоль юго-западной оконечности Крымского полуострова (рис. 1, *a*).

Представляется вероятным, что в ЮЗК этап сжатия активно начал проявляться в конце палеоцена – начале эоцена, а деформации концентрировались в более пластичных слоях: верхнемеловых (п.п. 13, 14) или палеоценовых мергелях (п.п. 7, 8), а также в нижнемеловых песчаноглинистых отложениях (п. 4). Логично связать надвиговые структуры как в верхнемеловых-миоценовых, так и в верхнеюрских-нижнемеловых отложениях с альпийскими фазами сжатия, начавшимися в конце палеоцена – начале эоцена [Вольфман, 2008; Khriachtchevskaia et al., 2010].

**Анализ основных направлений разрывных деформаций.** Обобщены ориентировки всех тектонических зеркал (мезоструктур) в пределах ЮЗК в породных комплексах от верхней юры до неогена. На стереограмме рис. 5, *a* полюса 2256 тектонических зеркал представлены в виде изолиний концентрации, и белыми кругами обведены наиболее крупные максимумы. На рис. 5, *b* показаны плоскости, отвечающие максимумам концентрации полюсов с соответствующими номерами.

Эти плоскости с азимутами простирания ЮЗ 260°, СЗ 290°, СВ 40° и СВ 65° отражают ориентировки наиболее часто встречаемых мезоструктур. На приведенной рядом карте ЗД-рельефа (рис. 5, *c*) отчетливо выделяются линейные аномальные зоны (макроструктуры), имеющие такие же направления, как и наиболее типичные тектонические зеркала с соответствующими номерами.

Промаркированные линеаменты интерпретируются как зоны активных разломов, по которым происходили/происходят деформации разных типов, в зависимости от ориентировки тектонических сил. Из анализа современного рельефа и полевых тектонофизических данных [Муровская, 2012] видно, что в неотектонический этап по зонам 1 и 4 происходят перемещения, имеющие сдвиговую и сбросовую составляющие, что естественно в условиях денудации орогена ГК.



**Рис. 5.** Сопоставление ориентации зеркал скольжения:

а – стереограммы полюсов 2256 зеркал скольжения и максимумы их концентраций; б – плоскости, соответствующие максимумам, и активизированные разломные зоны (с), которые визуально выделяются в рельефе

**Fig. 5.** The comparison of the orientation of the slickensides:

а – stereograms of the poles of 2256 slickensides and maximums of their concentrations; б – planes which responds to the maximums and activated fault zones (с), which obviously seen in the relief

Разломные зоны диагональной ориентировки свойственны и для структуры ЗЧВ (рис. 1, а). Ограничивающий южную оконечность Крыма надвиговый фронт, по сути, состоит из двух диагональных ветвей и, очевидно, обеспечивает поля сжатия ЮВ, Ю и ЮЗ ориентировок. То же можно сказать и о направлениях сбросов, связанных с раскрытием ЧМ (рис. 1, а).

Из анализа ориентировок и сопоставления структур мезо-(зеркала скольжения) и макроуровня (разломные зоны) видно их подобие, а значит, правомерно распространять заключения, полученные при интерпретации тектонических зеркал, на более крупные объекты.

**Анализ механизмов очагов землетрясений Крымско-Кавказской сейсмогенной зоны.**

Относительно слабосейсмичная глубоководная часть Черноморской впадины граничит на севере с Крымско-Кавказской сейсмогенной зоной (ККСЗ). Большая часть землетрясений этой зоны имеют магнитуду 4–5 и находятся в зоне шельфа и континентального склона; их очаги расположены в интервале глубин нижней коры – верхней мантии [Yegorova, Gobarenko, 2010]. Очевидно, что в настоящее время наиболее активные тектонические процессы проходят в зоне взаимодействия Черноморской микроплиты со Скифской плитой, на которой развился Крымский ороген [Гинтов и др., 2014]. Механизмы очагов землетрясений дают нам представление об ориентировке и динамике современных полей напряжений и помогают понять основные закономерности тектогенеза. Сейсмичность ККСЗ изучается с 1927 г. На основании анализа механизмов очагов 26 землетрясений, построенных и/или обобщенных [Пустовитенко Б.Г., 2002; Пустовитенко А. А., 2011] можно сделать следующие заключения:

1. Для изученных землетрясений характерно преобладание в очагах горизонтальной оси сжатия (рис. 6, а) и вертикальной оси растяжения (рис. 6, б). Такое распределение осей свидетельствует о преобладании взбросовых деформационных режимов (15 механизмов), для которых наиболее характерными являются два взаимно перпендикулярных направления сжатия: субширотное и субмеридиональное.

2. Со сбросовым деформационным режимом соотносятся 7 механизмов очагов, а со сдвиговым – 4 механизма (рис. 6, с).

3. Очаги с разными ориентировками сжатия не разделены территориально. Более того, в близко расположенных очаговых зонах могут сниматься напряжения прямо противоположных типов. Это значит, что по разрывам близких ориентировок через незначительные промежутки времени могут происходить разные типы перемещений – взбросы и сбросы, что объясняется сложностью и нелинейностью сеймотектонических процессов в регионе [Вольфман, 2014].

4. Сравнение кайнозойских напряжений, реконструированных по разрывам [Гинтов, 2005, Вольфман, 2008, Муровская, 2012], и напряжений в очагах землетрясений позволяет сделать вывод о том, что они относятся к разным типам. Для наземных разрывов характерно преобладание сдвиговых, а для очагов – взбросовых полей напряжений. Это может свидетельствовать о зональности в распределении деформаций и напряжений в направлении с юга на север и концентрации основных деформаций сжатия в довольно узкой зоне на границе плит.

**Сопоставление глубинных и поверхностных структур.** Очевидно, что эволюция ЧМ отразилась в его глубинном строении и структуре прилегающих континентальных окраин. Данные



В олигоцене начинается вторая фаза сжатия и воздымания ГК, о чем свидетельствует практическое отсутствие на изученной территории майкопской свиты олигоцен-раннемиоценового возраста и ее большие мощности в окружающих прогибах. Аналогичное предсреднемиоценовое несогласие связывают с фазой сжатия на северо-западном Кавказе. В Крыму этот период соотносят с формированием или углублением Альминского, Сорокинского и Индоло-Кубанского [Афанасенков и др., 2007].

Верхняя граница кайнозойского этапа является темой для обсуждения. Обнаруженные нами некоторые деформации сжатия в миоценовых известняках по масштабу меньше, чем таковые в более древних породах.

Сарматская трансгрессия, скорее всего, связана с некоторым замиранием тектонической активности, которая возобновляется в меотисе. Морфометрические и морфоструктурные исследования в пределах Внешней гряды Крымских гор и на территории смежной с ней Альминской впадины показали, что зоны разломов СЗ простирания активизируются в послесредне-сарматское время [Державна..., 2006].

Неотектонический этап орогенеза, начавшийся в среднем плиоцене воздыманием Горного Крыма, усиливается в конце плиоцена и достигает наибольшей интенсивности на рубеже плиоцена и квартала [Вольфман, 2008]. В настоящее время на фоне прогибания Черноморской впадины ГК интенсивно воздымается, а амплитуда поднятия за четвертичный период составляет +700 м [Верховцев, 2007]. Увеличивающийся контраст глубин между ними, уже составляющий около 3 км, и наличие сейсмической активности свидетельствуют об активном современном тектоническом процессе. Анализ механизмов очагов землетрясений показал, что для современного тектогенеза характерно преобладание обстановки сжатия. Однако, с учетом смены направлений и типов перемещений в одной очаговой зоне, говорить об устойчивом деформационном режиме можно с некоторой долей условности.

#### **Научная новизна**

*Деформации мезоуровня в верхнемеловых-неогеновых породах описаны впервые. Полученное для них поле сжатия свидетельствует о проявлении кайнозойских деформаций на изученной территории.*

По времени начало основного этапа сжатия мы относим к палеоцену–раннему эоцену. При этом в деформационный процесс были вовлечены и более древние отложения. Зеркала скольжения сдвигового и надвигового типов, а также принадвиговые складки и флексурные перегибы, связанные с полем сжатия, зафиксированы в

отложениях начиная от верхней юры. Соответствующие им поля напряжений характеризуются несколькими ориентировками осей сжатия. В западной части изученной территории преобладает ЮЗ-СВ сжатие, а для центральной и восточной частей характерно С-Ю и ЮВ-СЗ сжатие.

*Тектонические зеркала сбросового типа впервые рассмотрены в контексте раскрытия Западно-Черноморской впадины (ЗЧВ).*

Формирование ЗЧВ впадины на основе полевых геолого-структурных исследований в пределах Горного Крыма и анализа структуры земной коры по сейсмическим разрезам, пересекающим Западно-Черноморский бассейн, связывается с этапом растяжения, начавшемся в раннем мелу. Начало нижнемеловой фазы растяжения мы относим к валанжину – баррему, поскольку именно в этот период начинается формирование олистостром в ЮЗК, а также сбросо-сдвиговых и сбросовых конседиментационных разрывных нарушений, ограничивающих нижнемеловые впадины. Максимальной интенсивности процесс растяжения достигает в апте, что подтверждается наличием балаклавских вулканогенно-осадочных песчаников аптского возраста.

*Уточнены возрастные границы этапов деформации для породных комплексов Юго-Западного Крыма на основе анализа микропалеонтологических комплексов.*

#### **Практическое значение**

Тектонофизические исследования позволяют охарактеризовать параметры полей палео- и современных полей напряжений и деформаций, что является основой для установления характера и направления движущих сил, которые привели к структурообразованию в регионе. *Это необходимо при создании, проверке и уточнении геодинамических моделей, которые являются необходимым условием для дальнейших тектонических, сейсмопрогностических, инженерно-геологических исследований и составления различного рода картографических документов.*

Уточнение возраста осадочных отложений ЮЗК и, соответственно, этапов деформации позволяет по-новому рассматривать углеводородный потенциал Крымско-Черноморского региона.

*Информация о современном напряженно-деформированном состоянии ЮЗК необходима для прогнозирования негативных экзо- и эндогенных геологических процессов: землетрясений, оползней и других катастрофических явлений.*

Ориентировка современных полей напряжений и активных разломов позволит предсказать неблагоприятные для инженерных сооружений районы и уточнить карты сейсмического районирования.

### Выводы

Проведенные полевые исследования, обобщение материалов предыдущих тектонофизических работ, а также данных по механизмам очагов землетрясений и глубинной структуре позволяют сделать следующие выводы.

1. Формирование Западно-Черноморской впадины связано с этапом растяжения, начавшемся в начале раннего мела. Наличие растяжения в валанжине-апте подтверждается: а) присутствием сбросовых и сбросо-сдвиговых конседиментационных разрывных нарушений, ограничивающих нижнемеловые впадины; б) широким развитием олистостром; а также в) присутствием вулканитов аптского возраста. Датировки по нанопланктону позволяют считать, что формирование сбросов началось с валанжина-баррема.

2. Этап сжатия в палеоцене-раннем эоцене фиксируется в верхнемеловых-неогеновых породах сдвиговыми и надвиговыми структурами, а также складками и флексурными перегибами. Соответствующие им поля напряжений характеризуются несколькими ориентировками осей сжатия. В самой западной части изученной территории преобладает ЮЗ-СВ сжатие, а для центральной и восточной частей характерно С-Ю и ЮВ-СЗ сжатие.

3. Часть деформаций сжатия, ранее изученных в породах таврической серии, средней юры-нижнего мела относятся к кайнозойскому этапу.

5. Этапы мелового растяжения и кайнозойского сжатия отчетливо выделяются на сейсмических разрезах ГСЗ и ОГТ.

6. Современное сжатие подтверждается на основе анализа ориентировок осей главных нормальных напряжений механизмов очагов землетрясений ККСЗ.

7. Присутствие современных деформаций растяжения подтверждается 7 механизмами очагов и наличием молодых активизированных сбросов.

8. Современные деформации сжатия обусловлены давлением на Крымский п-в со стороны Черноморской микроплиты, а молодые сбросы связаны с углублением Черноморской впадины и денудацией Крымского орогена.

### Литература

Алехин В. И. Деформации горных пород и результаты реконструкций полей палеонапряжений мыса Фиолент (юго-западный Крым) по новым тектонофизическим данным / В. И. Алехин // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна. – 2012. – Вып. 16, № 206. – С. 184–192.

Афанасенков А. П. Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона / А. П. Афанасенков, А. М. Никишин, А. Н. Обухов. – М.: Научный мир, 2007. – 172 с.

Баранова Е. П. Переинтерпретация сейсмических материалов ГСЗ и гравитационное моделирование по профилям 25, 28 и 29 в Черном и Азовском морях / Е. П. Баранова, Т. П. Егорова, В. Д. Омельченко // Геофиз. журнал, 2008. – Т. 30, № 5. – С. 124–144.

Верховцев В. Г. Новейшие платформенные геоструктуры Украины и динамика их развития: автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора геологических наук / В. Г. Верховцев. – К., 2007. – 20 с.

Вольфман Ю. М. О влиянии кинематических обстановок на цикличность геологических процессов в пределах Крыма и Северного Причерноморья в течение альпийского этапа / Ю. М. Вольфман // Геофиз. журн. – 2008. – Т. 30, № 5. – С. 101–114.

Вольфман Ю. М. Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма / Ю. М. Вольфман // Геофиз. журнал. – 2014. – Т. 36, № 6. – С. 44–64.

Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. – Киев: Феникс, 2005. – 572 с.

Гинтов О. Б. Геодинамические особенности зоны сочленения Евразийской плиты и Альпийско-Гималайского пояса в пределах Украины и прилегающих территорий / О. Б. Гинтов, Т. П. Егорова, Т. А. Цветкова, И. В. Бугаенко, А. В. Муровская // Геофиз. журнал. – 2014. – Т. 36, № 4. – С. 26–63.

Гончар В. В. Масштаб и механизмы тектонических перемещений интрузий Южного берега Крыма по данным анализа палеонапряжений / В. В. Гончар О. Б. Гинто // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 2006. – № 6. – С. 11–19.

Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200 000. Кримська серія. Аркуші L-36-XXVIII (Євпаторія), L-36-XXXIV (Севастополь) та пояснювальна записка до неї. – К.: Державна геологічна служба, КП «Південнегеоцентр», 2006. – 175 с.

Иванов В. Е. Особенности тектоники юго-западного Крыма / В. Е. Иванов, И. Е. Ломакин, А. С. Тополюк, Л. Л. Ефремцева, С. Н. Болдырев // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2009. – № 4. – С. 27–39.

Муратов М. В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. – М.: Госнаучиздат, 1960. – 205 с.

Муровская А. В. Напряженно-деформированное состояние Западного Горного Крыма в олигоцен-четвертичное время по тектонофизическим данным / А. В. Муровская // Геофиз. журн. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 109–119.

Муровская А. Деформации верхнемеловых – неогеновых отложений юго-западного Крыма по тектонофизическим данным / А. Муровская, Е. Шермет, Е. Колесникова, О. Лазаренко // Геофиз. журнал. – 2014. – Т. 36, № 6. – С. 79–92.

- Пустовитенко А. А. Каталог механизмов очагов (Крым) / А. А. Пустовитенко // Землетрясения Северной Евразии в 2005 году. – Обнинск: ГС РАН. – 2011. – С. CD.
- Пустовитенко Б. Г. Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет / Б. Г. Пустовитенко // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2002. – С. 59–64.
- Юдин В. В. Геологическая карта и разрезы Горного, Предгорного Крыма. Масштаб 1:200 000. – Симферополь: Союзкарта, 2009.
- Юдин В. В. Геодинамика Крыма. – Симферополь: Диайпи, 2011. – 335 с.
- Devlaux D., Sperner B. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. New insights into Structural interpretation and Modelling. Geological Society, London, Special Publications, 2003, v. 212, pp. 75–100.
- Finetti I., Bricchi G., Del Ben A. et al. Geophysical study of the Black Sea. Boll. Geol. Teor. Ed Applicata, 1988, v. 30, no. 117-118, pp. 197–324.
- Hippolite J.-C. Geodynamics of Dobrogea (Romania): new constraints on the evolution of the Tornquist-Teisseyre Line, the Black Sea and the Carpathians. Tectonophysics, 2002, no. 357, pp. 33–53.
- Hippolite J.-C., Muller C., Kaymakci N., Sangu E. Dating of the Black Sea Basin: new nannoplankton ages from its inverted margin in the Central Pontides (Turkey). Geological Society, London, Special Publications, 2010, v. 340, pp. 113–136.
- Hippolite J.-C., Murovskaya A., Muller C., Volfman Yu., Yegorova T., Gintov O., Sosson M., Sheremet (Korniyenko) Ye. Preliminary study of Cretaceous normal faulting in Western Crimea. Special Darius publication of final symposium December 8–9, 2014, pp. 66–67.
- Kaymakci N., Graham R., Bellingham P., Horn B. Deep structure and tectonics of Black Sea basin inferred from seismic data (BLACKSEA-SPAN). Special Darius publication of final symposium December 8–9, 2014, pp. 70–71.
- Khriachtchevskaia O., Stovba S., & Stephenson R. Cretaceous–Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. In: Sosson, M., Kaymakci, N., Stephenson, R. A., Bergerat, F. & Starostenko, V. (eds) Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform. Geological Society, London, Special Publications, 2010, v. 40, pp. 137–157.
- Nikishin A. M., Koroyayev M.V., Ershov A. V., Brunet M.-F. The Black Sea basin: tectonic history and Neogene-Quaternary rapid subsidence modeling. *Sedimentary Geology*, 2003, no. 156, pp. 149–168.
- Nikishin A. M., Okay A., Tüysüz O., Demirer A., Wannier M., Amelin N., Petrov E. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 2: Tectonic history and paleogeography, *Marine and Petroleum Geology*, 2014, (in press). Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.018>
- Robinson A., Rudat J. H., Banks C. J. & Wiles R. L. F. Petroleum geology of the Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, v. 13, no. 2, pp. 195–223.
- Saintot A., Angelier J., Chorowicz J., Mechanical significance of structural patterns identified by remote sensing studies: a multiscale analysis of tectonic structures in Crimea. *Tectonophysics*, 1999, no. 313, pp.187–218.
- Sheremet Y, Sosson M, Muller C, Murovskaya A, Gintov O., Yegorova T. and Hippolite J.-C. New stratigraphic and structural data from the East Crimea mountains: consequence on the tectonic evolution of the Eastern Black Sea basin. Special Darius publication of final symposium December 8-9, 2014, pp. 136–137.
- Zonenshain L. P., Le Pichon X. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics*, 1986, no. 123, pp.181–211.
- Yegorova T., Gobarenko V. Structure of the Earth's crust and upper mantle of West- and East Black Sea Basins revealed from geophysical data and their tectonic implications. In: Sosson M., Kaymakci N., Stephenson R., Bergerat F., Starostenko V. (eds.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Geological Society, 2010, London, Special Publications, no. 340, pp. 23–42.
- Yegorova T., Baranova E., Omelchenko V. The crustal structure of the Black Sea from the reinterpretation of deep seismic sounding data acquired in the 1960s. In: Sosson M., Kaymakci N., Stephenson R., Bergerat F., Starostenko V. (eds.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Geological Society, 2010, London, Special Publications, no. 340, pp. 43–56.

А. МУРОВСЬКА<sup>1</sup>, Ж.-К. ППОЛІТ<sup>2</sup>, Є. ШЕРЕМЕТ<sup>1,4</sup>, Т. ЄГОРОВА<sup>1</sup>, Ю. ВОЛЬФМАН<sup>3</sup>,  
К. КОЛЕСНИКОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут геофізики НАН України, вул. Палладіна, 32, Київ, Україна, 03680  
тел.+38(066)2255285, ел. адреса murovskaya@gmail.com

<sup>2</sup>Університет Аікс-Марсель, GEREGE UMR 34 CNRS-IRD, BP 80, Аікс-ен-Прованс, Франція, 13545

<sup>3</sup>Інститут геофізики НАН України, вул. Гагаріна 20, Сімферополь, Україна, 95026

<sup>4</sup>Університет Ніцца–Софія–Антиполіс, CNRS, OCA-UMR Геоазур, Вальбонн, Франція, 06560

## ДЕФОРМАЦІЙНІ СТРУКТУРИ ТА ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ ПІВДЕННО-ЗАХІДНОГО КРИМУ В КОНТЕКСТІ ЕВОЛЮЦІЇ ЗАХІДНО-ЧОРНОМОРСЬКОГО БАСЕЙНУ

**Мета.** Вивчити деформації мезорівня (дзеркала ковзання, тріщини, розломи) в породних комплексах різного віку, відновити відповідні їм поля напружень. Порівняти результати з попередніми тектонофізичними даними, з відомими сейсмічними розрізами та механізмами вогнищ землетрусів Кримсько-Кавказької сейсмогенної зони, проаналізувавши їх в контексті тектонічної еволюції Західно-Чорноморського басейну. Визначити тектонічні етапи й уточнити вік деформацій. **Методика.** Деформації вивчалися у двох різновікових осадових комплексах. У відкладах нижньої крейди і на контакті порід нижньої крейди та верхньої юри досліджувалися конседиментаційні розривні порушення та деформації. Другу групу об'єктів вивчали на відслоненнях порівняно молодого верхньокрейдового-неогенового осадового комплексу. Для обробки дзеркал ковзання та механізмів вогнищ землетрусів застосовано кінематичний метод і програму Win Tensor [Devlaux, Sperner, 2003], а для побудови стереограм – програму Stereo 32 К. Руллера та К.Трепманн. **Результати** аналізу дають змогу виділити два етапи в тектонічній еволюції Південно-Західного Криму (ПдЗК). *Етап розтягу* в ранній крейді підтверджується тектонічними дзеркалами скидового типу зі збереженими давніми борознами ковзання, тектонічною брекчією та слідами морських прикріплених організмів.. Азимут простягання дзеркал 250–320°. Відповідні їм поля напружень характеризуються Пн-Пд, ПнЗ-ПдС і ПнС-ПдЗ орієнтацією діючої осі розтягу. Згідно з новими стратиграфічними даними можна зробити висновок, що скидоутворення почалося, щонайменше, з валанжину-баррему та, найімовірніше, пов'язане з розкриттям в ранній крейді Західно-Чорноморського басейну [Hippolit et al., 2014, Sheremet et al., 2014]. Переінтерпретація сейсмічного профілю ГСЗ 25, що перетинає західну частину Чорного моря в субмеридіональному напрямку, показала широтний високоамплітудний скид уздовж схилу континентального шельфу, по якому відбувалось розкриття Західно-Чорноморської западини в результаті рифтогенезу [Yegorova et al., 2010; Баранова та ін., 2008]. Цей розлом розташований на західному морському продовженні серії скидів нижньокрейдового віку, виявлених в ПдЗК Криму і може мати ранньокрейдовий вік. *Етапи стиснення* фіксуються у верхньокрейдових-неогенових породах насувними і зсувними структурами і належать до палеоцену–раннього міоцену. Відповідні їм поля напружень характеризуються декількома напрямками орієнтації осей стиску. У найзахіднішій частині вивченої території переважає ПдЗ-ПнС стиск, а для центральної та східної частин характерний стиск у Пн-Пд і ПнЗ-ПдС напрямках. На відслоненнях верхньоярського–нижньокрейдового осадового комплексу зафіксовані підкиди, для яких відновлена Пн-Пд орієнтація осей стиску. Відповідно, деякі деформації стиску, раніше вивчені в породах таврійської серії, середньої юри–нижньої крейди, могли активізуватися в період кайнозойського стиску. Етапи кайнозойського стиску чітко виділяються на сейсмічних розрізах ОГТ, що фіксують насиви і принасувні складки. Польові дані показують стиск також і в породах міоцену, але ці деформації за масштабом менші, ніж в період палеоцен-раннього еоцену та пізнього еоцену–олігоцену. Сучасний стиск широтного і меридіонального напрямків визначається на основі аналізу 26 механізмів вогнищ землетрусів. Водночас 7 механізмів вказують на розтяг, як і ряд молодих активізованих скидів. За орієнтацією відновлених осей напружень можна зробити висновок, що деформації стиску зумовлені тиском з боку Чорноморської мікроплити на Гірський Крим, а сучасні скиди пов'язані з поглибленням Чорноморської западини і денудацією Кримського орогену. **Наукова новизна.** Деформації мезорівня у верхньокрейдових–неогенових породах описано вперше. Одержане для них поле стиску свідчить про наявність кайнозойських деформацій на всій вивченій території. Тектонічні дзеркала скидового типу вперше розглянуто в контексті розкриття Західно-Чорноморської западини. Уточнені вікові границі етапів деформації для породних комплексів ПЗК. **Практична значущість.** Інформація про напружено-деформований стан ЗГК необхідна для прогнозування негативних екзо- та ендегенних геологічних процесів: землетрусів, зсувів та інших катастрофічних явищ. Уточнення геодинамічної моделі необхідне для подальших сеймопрогностичних, інженерно-геологічних досліджень і складання різних картографічних документів.

**Ключові слова:** Південно-Західний Крим; дзеркало ковзання; розтяг; стиск; Західно-Чорноморський басейн; еволюція полів напружень.

A. MUROVSKAYA<sup>1</sup>, J.-C. IPPOLITE<sup>2</sup>, YE. SHEREMET<sup>1,4</sup>, T. YEGOROVA<sup>1</sup>, YU. VOLFMAN<sup>3</sup>,  
YE. KOLESNIKOVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Pr. Palladina 32, Kiev, Ukraine, 03680  
tel. +38(066)2255285, email: murovskaya@gmail.com

<sup>2</sup>Aix-Marseille University, GEREGE UMR 34 CNRS-IRD, BP 80, Aix-en-Provence, France, 13545

<sup>3</sup>Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Gagarina str., 20, Simferopol, Ukraine, 95026

<sup>4</sup>University of Nice-Sophia-Antipolis, CNRS, OCA-UMR Geoazur, Valbonne, France, 06560

#### DEFORMATIONAL STRUCTURES AND STRESS FIELD OF THE SOUTH-WESTERN CRIMEA IN THE CONTEXT OF THE EVOLUTION OF WESTERN BLACK BASIN

The **purpose** of this paper is to describe and analyze the deformations of the mesolevel (slickensides, fractures, faults) in the rock complexes of different age, to reconstruct the stress fields which corresponds to them. The results of interpretation will be compared with the previous studies as well as with known seismic sections and with earthquake focal mechanisms Of Crimean-Caucasian seismogenic zone, analyzing them in the context of tectonic evolution of Western-Black Sea Basin. To define the tectonic stages, specifying the age of deformation. **Methodology.** The deformations were studied in two sedimentary complexes of different ages. Cosedimentary fractures and faults were studied in the Lower Cretaceous deposits and deformations in the contact between Upper Jurassic and Lower Cretaceous rocks. The other studied group of deformational objects were investigated in outcrops of Upper Cretaceous – Neogene rock complex. In the processing and interpretation of the slickensides the kinematic method and the program Win Tensor [Devlaux, Sperner, 2003] was used, and the program Stereo 32 by K. Ruller and K. Trepmann was used to build the stereograms. **Results** of the analysis allow us to define at least two generalized stages in the tectonic evolution of South Western Crimea (SWC). About the *extensional stages* the slickensides of normal type are evidenced by the normal faults which contain the relict slickensides, tectonic breccias and traces of attached marine organisms. The strike azimuth of the slickensides is 250–320°. The corresponding stress fields are characterized by N-S, NE-SW and NW-SE orientation of the extensional axis. According to new stratigraphy dating and structural analysis it is possible to conclude that the period of normal faulting started at least in valanginian-barremian, which is connected to the opening of Western Black Sea Basin during Early Cretaceous [Hippolit et al., 2014, Sheremet et al. 2014]. Reinterpretation of the seismic profile DSS 25 which crosses western part of the Black-Sea in the submeridional direction, shows the latitudinal normal fault of high amplitude along the margin of the continental shelf slope, which could be used during the rifting stage of the opening of the Western Black Sea Basin [Yegorova et al., 2010; Baranova et al., 2008]. This fault is located on the western marine prolongation of the series of normal faults of Early Cretaceous, which were defined in SWC, and it could be of the same age. *The compressional stage* is fixed in the Upper Cretaceous – Neogene rocks with strike-slip and thrust structures, which are related with the compression during Paleocene-Early Miocene. The stress-field which corresponds to those structures is characterized by several orientation of the axis of compression. In the western part of the study area the SW-NE compression is prevails, but for the Central and Eastern part there are N-S and SE-NW compression. In the some outcrops of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous sedimentary complex the strike-slip and reverse faults are observed. The recovered stress field shows N-S and NW-SE orientation of the axis of compression. Respectively, some compressional deformation studied previously in the Tavrik Unit, Middle Jurassic and Lower Cretaceous could be reactivated in the period of Cenozoic compression. Cenozoic compression stages are clearly distinguished in the CDP seismic sections, fixing thrusts and folds at the thrust faults. Our data shows also the compression during Miocene, but those deformations are not commensurate with those during Paleocene-Early Eocene and Late Eocene-Oligocene. The resent compression of latitudinal and meridional trending was defined on the base of 26 earthquake focal mechanisms. At the same time, seven mechanisms pointed out to extension (the same results we obtained from the analysis of young normal faults). According to the results of recovering of the stress axis it is possible to conclude that the compression deformation appeared because of the pressure of Black Sea plate to the Crimea but recent normal faults are connected to the continue of the dipping of Black Sea Basin and with the denudation of Crimea Mountains. **Originality.** Deformation of mesolevel in the Upper Cretaceous-Neogene rocks are described for the first time. Obtained for them the compression field evidences of the manifestation of Cenozoic deformation in the study area. The normal type tectonic slickensides for the first time considered in the context of the opening of the Western Black Sea basin. Age frames for stages of deformation of rock complexes of SWC are specified. **Practical significance.** The information about stress-strain condition of WSC is very important for the prediction of the negative exo- and endogenous geological processes: the seismic activity, landslides and other dangerous events. Clarifying of the geodynamic model is necessary for further seismic predictability, engineering geological investigations and preparation of various types of cartographic documents.

*Key words:* South Western Crimea; slickenside; extension; compression; Western Black-Sea Basin; stress field evolution.

## REFERENCES

- Alehin V. I. *Deformacii gornyh porod i re-zul'taty rekonstrukcij polej paleonaprjazhenij mysa Fiolent (jugo-zapadnyj Krym) po novym tek-tonofizicheskim dannym* [Rock deformation and results of fields reconstructions of Cape Phiolent palaeostresses (the South-Western Crimea) on new tectonophysical data]. *Naukovi praci DonNTU. Serija girnicho-geologichna*, 2012, 16 (206), pp. 184–192.
- Afanasenkov A. P., Nikishin A. M., Obukhov A. N. *Geologicheskoe stroenie i uglevodorodnyj potencial Vostochno-Chernomorskogo regiona* [Geological structure and hydrocarbon potential of the Eastern Black Sea region]. Moscow, Nauchnyj mir, 2007, 172 p.
- Baranova, E. P., Yegorova, T. P., Omelchenko, V. D. *Pereinterpretacija sejsmicheskikh materialov GSZ i gravitacionnoe modelirovanie po profiljam 25, 28 i 29 v Chernom i Azovskom morjah* [Reinterpretation of DSS seismic materials and gravity modeling along the profiles 25, 28 and 29 in the Black Sea and the Sea of Azov]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical Journal*, 2008, no. 5, pp. 1–20.
- Verhovtsev V. G. *Noveyshie platformennye geostrukturny Ukrainy i dinamika ih razvitiya: avtoreferat diss. na soiskanie uchenoy stepeni doktora geologicheskikh nauk* [he newest platform geostructures of Ukraine and the dynamics of their development. In: the author's diss. for the degree of PhD]. Kiev, 2007, 20 p.
- Volfman Yu. M. *O vlijanii kinematicheskikh obstanovok na ciklichnost' geologicheskikh processov v predelah Kryma i Severnogo Prichernomor'ja v techenie al'pijskogo jetapa* [The effect of kinematic environments on the cyclical geological processes within the Crimea and the Northern Black Sea region during the Alpine stage]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical Journal*, 2008, vol. 30, no. 5, pp. 101–114.
- Volfman Yu. M. *Deformacionnye rezhimy i kinematicheskie obstanovki novjshogo tektonicheskogo razryvoobrazovaniya v predelah Gornogo Kryma* [Deformational regimes and kinematic conditions of the newest tectonic faulting withing the Crimea Mountains]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical Journal*, 2014, vol. 36, no. 6, pp. 44–64.
- Gintov O. B. *Polevaja tektonofizika i ee primenenie pri izuchenii deformacij zemnoj kory Ukrainy* [Field tectonophysics and its application in the study of the Earth's crust deformation in Ukraine]. Kiev, Feniks, 2005, 572 p.
- Gintov O. B., Egorova T. P., Tsvetkova T. A., Bugaenko I. V., Murovskaya A. V. *Geodinamicheskie osobennosti zony sochlenenija Evrazijskoj plity i Al'pijsko-Gimalajskogo pojasa v predelah Ukrainy i priliegajushhij territorij* [Geodynamic features of the junction zone between the Eurasian plate and the Alpine-Himalayan belt within Ukraine and adjacent territories]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical Journal*, 2014, vol. 36, no. 4, 2014, pp. 26–63.
- Gonchar V. V., Gintov O. B. *Masshtab i mehanizmy tektonicheskikh peremeshhenij intruzij Juzhnogo berega Kryma po dannym analiza paleonaprjazhenij* [Scale and mechanisms of tectonic movements of the intrusions of the Southern coast of the Crimea by the palaeostresses analysis]. *Izv. Vuzov. Geologija i razvedka – Proc. Universities. Geology and Exploration*, 2006, no. 6, pp. 11–19.
- Ivanov V. E., Lomakin I. E., Topolyuk A. S., Efremtseva L. L., Boldyrev S. N. *Osobennosti tektoniki jugo-zapadnogo Kryma* [Features of tectonics of the South-Western Crimea]. *Geologija i poleznye iskopaemye mirovogo okeana – Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 2009, no. 4, pp. 27–39.
- Muratov M. V. *Kratkij ocherk geologicheskogo stroenija Krymskogo poluostrova* [A brief sketch of the geological structure of the Crimean peninsula]. Moscow, State.scientific and engineering. publ. literature on geology and subsoil protection, 1960, 206 p.
- Murovskaya A. V. *Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanoe Zapadnogo Gornogo Kryma v oligocen-chetvertichnoe vremja po tektonofizicheskim dannym* [Stress-strained state of the Western Mountain Crimea in Oligocene-Quaternary according to tectonophysical data]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical Journal*, 2012, vol.34, no. 2, pp. 109–119.
- Murovskaya A., Sheremet Y., Kolesnikova Y., Lazarenko O. *Deformacii verhnemelovyh – neogenovyh otlozhenij jugo-zapadnogo Kryma po tektono-fizicheskim dannym* [Deformation in the Upper Cretaceous – Neogene sediments of the south-western Crimea on the base of tectonophysical data]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical Journal*, 2014, vol. 36, no. 6, pp. 79–92.
- Derzhavna geologichna karta Ukraini. Masshtab 1:200 000. Krims'ka serija. Arkushi L-36-XXVIII (Cvptorija), L-36-XXXIV (Sevastopol') ta pojasnjuval'na zapiska do neyi* [State geological map of Ukraine. Scale 1: 200 000. Crimean series. Sheets L-36-XXVIII (Evpatoria), L-36-XXXIV (Sevastopol) and its explanatory note]. Kiev, Derzhavna geologichna sluzhba, KP «Pivdenekogeocentr» – Kyiv, State Geological Survey, KP "Pivdenekogeotsentr», 2006, 175 p.
- Pustovitenko A. A. *Katalog mehanizmov ochagov (Krym)*. [The catalogue of the mechanisms of seismic centers (The Crimea)] *Zemletrjasenija Severnoj Evrazii v 2005 godu* [The earthquakes of the Northern Eurasia in 2005], Obninsk, GS RAS, 2011, on CD.
- Pustovitenko, B. G. *Mehanizm ochagov oshhutimyh zemletrjasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona poslednih 20 let* [Mechanism of notable earthquakes of Crimea-Black Sea region of last 20 years]. *Sejsmologicheskij bjulleten' Ukrainy za 2000 god* [Seismological Bulletin of Ukraine for the 2000 Year], Sevastopol, EKOSIGydrofizika, 2002, pp. 59–64.

- Yudin V. V. *Geologicheskaya karta i razrezy Gornogo, Predgornogo Kryma. Masshtab 1:200 000* [Geologic map and sections of the Mountain, Foothill Crimea. Scale 1:200 000]. Simferopol, Soyuzkarta, 2009.
- Yudin V. V. *Geodinamika Kryma* [Geodynamics of the Crimea]. Diaypi, Simferopol, 2011, 335 p.
- Devlaux D., Sperner B. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. New insights into Structural interpretation and Modelling. Geological Society, London, Special Publications, 2003, v. 212, pp. 75–100.
- Finetti I., Bricchi G., Del Ben A. et al. Geophysical study of the Black Sea. *Boll. Geol. Teor. Ed Applicata*, 1988, v. 30, no. 117-118, pp. 197-324.
- Hippolite J.-C. Geodynamics of Dobrogea (Romania): new constraints on the evolution of the Tornquist-Teisseyre Line, the Black Sea and the Carpathians. *Tectonophysics*, 2002, no. 357, pp. 33–53.
- Hippolite J.-C., Muller C., Kaymakci N., Sangu E. Dating of the Black Sea Basin: new nannoplankton ages from its inverted margin in the Central Pontides (Turkey). Geological Society, London, Special Publications, 2010, v. 340, pp. 113–136.
- Hippolite J.-C., Murovskaya A., Muller C., Volfman Yu., Yegorova T., Gintov O., Sosson M., Sheremet (Korniyenko) Ye. Preliminary study of Cretaceous normal faulting in Western Crimea. Special Darius publication of final symposium December 8-9, 2014, pp.66-67.
- Kaymakci N., Graham R., Bellingham P., Horn B. Deep structure and tectonics of Black Sea basin inferred from seismic data (BLACKSEA-SPAN). Special Darius publication of final symposium December 8–9, 2014, pp. 70–71.
- Khriachtchevskaia O., Stovba S., & Stephenson R. Cretaceous–Neogene tectonic evolution of the northern margin of the Black Sea from seismic reflection data and tectonic subsidence analysis. In: Sosson, M., Kaymakci, N., Stephenson, R. A., Bergerat, F. & Starostenko, V. (eds) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Geological Society, London, Special Publications, 2010, v. 40, pp. 137–157.
- Nikishin A. M., Koroyaev M. V., Ershov A. V., BRUNET M.-F. The Black Sea basin: tectonic history and Neogene-Quaternary rapid subsidence modeling. *Sedimentary Geology*, 2003, no. 156, pp. 149–168.
- Nikishin A. M., Okay A., Tüysüz O., Demirer A., Wannier M., Amelin N., Petrov E. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. Part 2: Tectonic history and paleogeography, *Marine and Petroleum Geology*, 2014, (in press). Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.018>
- Robinson A., Rudat J. H., Banks C. J. & Wiles R. L. F. *Petroleum geology of the Black Sea*. Marine and Petroleum Geology, 1996, v. 13, no. 2, pp. 195–223.
- Saintot A., Angelier J., Chorowicz J., Mechanical significance of structural patterns identified by remote sensing studies: a multiscale analysis of tectonic structures in Crimea. *Tectonophysics*, 1999, no. 313, pp.187–218.
- Sheremet Y., Sosson M., Muller C., Murovskaya A., Gintov O., Yegorova T. and Hippolite J.-C. New stratigraphic and structural data from the East Crimea mountains: consequence on the tectonic evolution of the Eastern Black Sea basin. Special Darius publication of final symposium December 8-9, 2014, pp. 136–137.
- Zonenshain L. P., Le Pichon X. Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics*, 1986, no. 123, pp.181–211.
- Yegorova T., Gobarenko V. Structure of the Earth's crust and upper mantle of West- and East Black Sea Basins revealed from geophysical data and their tectonic implications. In: Sosson M., Kaymakci N., Stephenson R., Bergerat F., Starostenko V. (eds.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Geological Society, 2010, London, Special Publications, no. 340, pp. 23–42.
- Yegorova T., Baranova E., Omelchenko V. The crustal structure of the Black Sea from the reinterpretation of deep seismic sounding data acquired in the 1960s. In: Sosson M., Kaymakci N., Stephenson R., Bergerat F., Starostenko V. (eds.) *Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian Platform*. Geological Society, 2010, London, Special Publications, no. 340, pp. 43–56.

Надійшла 19.12.2014 р.