

УДК 551.24.03(477)

В. И. Алёхин

*Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина*

## Деформации горных пород и результаты реконструкций полей палеонапряжений мыса Фиолент (юго-западный Крым) по новым тектонофизическим данным

Показаны результаты структурно-геологических и тектонофизических исследований на участке западного ограничения мыса Фиолент. Установлены многочисленные крутопадающие дайки и жилы северо-западного простираения, секущие вулканогенные образования средней юры. Исследованы разрывные тектонические нарушения, деформирующие юрские вулканогенные породы и известняки неогена. В юрских и неогеновых дислоцированных образованиях проведены реконструкции полей напряжений и деформаций, установлены их параметры, а также особенности их пространственного распределения. Исследованы условия формирования разрывных дислокаций на разных этапах их развития.

**Ключевые слова:** деформации, напряжения, дайки, жилы, разрывные дислокации, базальты, известняки.

Мыс Фиолент располагается в окрестностях г. Севастополя в пределах Гераклейского полуострова. Гераклейский полуостров занимает крайнюю юго-западную часть Горного Крыма. В тектоническом плане эта территория представляет собой обособленный, вулканотектонический блок. Площадь исследований в плане тектонофизической изученности слабо освещена в литературе. В настоящее время существует несколько моделей тектонического развития и строения Горного Крыма. Так Л. С. Борисенко, Л. Г. Плахотный, С. В. Пивоваров и др. придерживаются разломно-блоковой модели региона [1, 2]. Согласно представлениям В. В. Юдина структура Крыма определяется сутурными зонами и крупномасштабными горизонтальными перемещениями блоков земной коры региона с юга на север [3]. Ю. В. Казанцев придерживается покровно-шарьяжной концепции и связывает формирование тектонических структур Горного Крыма с крупномасштабными перемещениями горных масс в южном направлении [4]. В связи с этим для понимания истории развития Горного Крыма, определения роли горизонтальных и вертикальных движений в формировании тектонических структур мыс Фиолент представляет собой отличный полигон. Во-первых, здесь хорошо обнажены две возрастные группы горных пород и четко видны переходы между ними. Во-вторых, на большом протяжении доступны для изучения многочисленные тектонические структуры (разрывные нарушения различного кинематического типа, дайки, жилы). В-третьих, широко развиты зеркала скольжения со штрихами и бороздами на плоскостях тектонических разрывов и трещин, позволяющие выполнить реконструкции полей палеонапряжений в разные этапы тектонического развития данной площади. В обнажениях горных пород наблюдаются структурные реперы, которые позволяют однозначно определить направления движения крыльев разрывных дислокаций. Это многочисленные жилы, дайки, границы различных потоков лавы, граница юрских вулканогенных пород и известняков неогена. Очень важно, что на данном участке мы можем наблюдать редкие для региона проявления четких тектонических деформаций неогеновых отложений – смещения границ пород, подвороты, зеркала скольжения с хорошо проявленными бороздами и штрихами.

Основной целью исследований на площади мыса Фиолент являлось установление особенностей формирования и проявления тектонических деформаций в разных по составу и возрасту породах, характер и причины изменчивости в пространстве и времени параметров полей палеонапряжений и деформаций.

В данной работе представлены материалы изучения наиболее интересного в плане тектоники участка мыса Фиолент – его западного ограничения (рис. 1). Участок сложен вулканическими образованиями средней юры, которые с угловым и стратиграфическим несогласием перекрываются органогенно-детритовыми и глинистыми известняками сарматского яруса неогена. Субвулканические образования средней юры представлены потоками лавы,

лавобрекчиями, туфолавами и туфами от основного до среднего состава. Лавовые потоки прорываются крутопадающими дайками различной мощности. Дайки сложены субвулканическими породами основного, среднего и кислого состава. На участке наблюдается крупное разрывное нарушение, деформирующее породы юры и неогена (рис. 2).



Рис.1. Расположение участка тектонофизических исследований на мысе Фиолент.

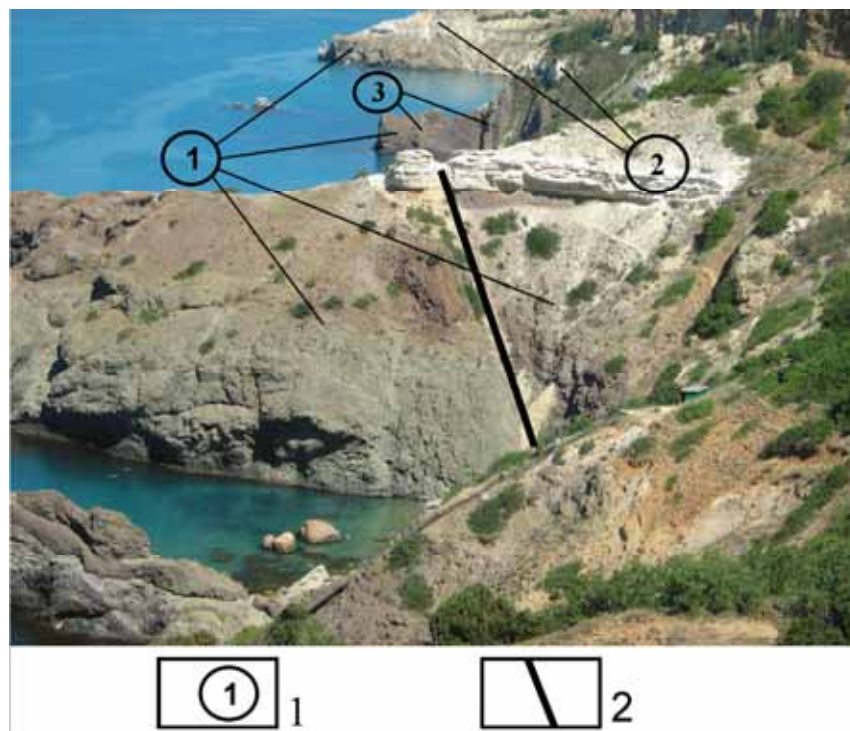


Рис. 2. Геологические образования мыса Фиолент:

1 – горные породы различного возраста и их номера: 1 – лавы и туфолавы основного состава средней юры, 2 – неогеновые известняками сарматского яруса, 3 – магматические дайки основного и среднего состава; 2 – разрывное нарушение сбросового типа в юрских породах, деформирующее неогеновые отложения.

Исследование деформаций на участке проводилось с использованием классических структурно-геологических методов и специальных тектонофизических исследований. На полевом этапе замерялись элементы залегания разрывных нарушений, даек и жил. Изучались формы проявления разрывов: наличие зон катаклаза, глинки трения, зеркал скольжения, зон вторичных изменений вмещающих горных пород (лимонитизации, кальцитизации, окварцевания, эпидотизации и др.). По смещению крупных геологических границ определялся морфологический тип разрывного нарушения. Исследовались следы скольжения на зеркалах зоны разрывных нарушений и тектонических трещин. Измерялись элементы залегания борозд и штрихов на зеркалах скольжения. По треугольникам выкрашивания, утонению борозд и штрихов определялось направление смещения крыльев разрывных дислокаций. При этом особое внимание уделялось следам скольжения по жильному заполнению разрывов и тектонических трещин, так как по таким следам направление смещения определяется с наибольшей степенью вероятности.

Для реконструкции полей напряжений использовались три компьютерные программы: «Fabric», автор Е. Wallbrecher (Австрия); «Geos», автор О.И. Гущенко (Россия); «Win-Tensor», автор D. Delvaux (Нидерланды). Использование трех программ разных авторов обусловлено следующими причинами. Во-первых, две программы («Fabric», «Win-Tensor») широко используются в Западной Европе. Программа «Geos» популярна в России и Украине. Во-вторых, в печати отсутствуют сведения о сопоставлении результатов работы этих программ, что ограничивает возможности кооперации научных исследований ученых разных стран. В-третьих, существуют большие трудности в интерпретации результатов тектонофизических исследований теоретического и технического плана. Получение близких результатов реконструкции полей напряжений и деформаций разными программами повышает достоверность интерпретации тектонофизических данных. Все названные программы основываются на принципе выделения и суммирования секторов сжатия и растяжения, определяемых на стереограммах для каждой подвижки и тектонической трещины. Наложение одноименных секторов на стереограммах при строгой перпендикулярности областей сжатия и растяжения позволяет установить положение проекций осей напряжения. Зарубежные авторы используют технологию, описанную в работе Angelier и Mechler (1977) [5]. При этом программа «Fabric» позволяет определить положение в пространстве и элементы залегания главных нормальных осей поля напряжения, но не позволяет определить вид напряженного состояния массива и разделить поля, действующие в разные этапы развития деформаций. Программа «Win-Tensor» эти задачи решает. Эта программа обладает широким спектром критериев для селекции и выделения однородных полей напряжения по разновозрастным зеркалам скольжения различного кинематического типа. В данной программе используется усовершенствованный метод правой дигитры и метод ротационной оптимизации, которые существенно облегчают задачу интерпретации тектонофизических данных [6]. Кроме того программа «Win-Tensor» позволяет визуальным образом на экране компьютера контролировать процесс обработки и селекции данных, сопоставлять результаты реконструкций с конкретной структурной обстановкой и выбирать оптимальное решение исходя из многочисленных критериев.

В основе программы «Geos» лежит кинематический метод реконструкции полей напряжений, разработанный О.И. Гущенко [7, 8]. Программа позволяет решать многие тектонофизические задачи: разделять поля напряжений различного типа и возраста, определять элементы залегания главных нормальных осей этих полей в пространстве, рассчитывать тип напряженного состояния массива, определять параметры суммарного поля деформаций и строить карты распределения параметров по площади. Но контролировать селекцию и обработку данных непосредственно в процессе работы программы «Geos» невозможно. Выбор оптимального решения определяется минимальным числом несоответствий зеркал и направлений подвижек выбранному полю, а также минимальной дисперсией параметра  $\mu_{\sigma}$ . Параметр  $\mu_{\sigma}$  рассчитывается по соотношению главных нормальных осей и характеризует вид напряженного состояния массива.

В результате проведенных исследований на площади развития юрских вулканогенных образований установлены многочисленные дайки основных и средних магматических пород, секущие лавовые потоки базальтов. Реже встречаются дайки кислого состава. Простираение даек чаще всего северо-западное. Мощность колеблется от десятков сантиметров до 1,5 м. Падение даек крутое (75-90°). Контакты даек с вмещающими породами часто сорваны и вдоль них наблюдаются тектонические трещины со следами скольжения. Иногда дайки обрезаются пологопадающими плоскостями вдоль границ лавовых потоков. Вулканогенные породы повсеместно разбиты

различно ориентированными тектоническими трещинами с зеркалами скольжения. Анализ штрихов и борозд скольжения на зеркалах указывает на наличие взбросовых, сбросовых и сдвиговых перемещений. Часто на одной плоскости можно наблюдать разные кинематические типы перемещений. Все это указывает на многоэтапное формирование разрывных дислокаций участка в юре.

На участке прослеживаются крупные разрывные нарушения, которые выражены разлинзованием и дроблением пород, тектоническими швами с глиной трения, густой трещиноватостью с зеркалами скольжения, вторичными изменениями. Наиболее распространены вторичные изменения – лимонитизация и кальцитизация вдоль разрывов, развиты также эпидотизация и хлоритизация пород.

Наиболее интересной структурой на участке, деформирующей юрские породы, является сброс. Это разрывное нарушение имеет амплитуду смещения крыльев в десятки метров, что хорошо видно по смещению лавовых потоков базальтов различного состава (см. рис. 2). Разрывное нарушение деформирует и выше залегающие известняки неогена, что говорит об его активизации в неоген – четвертичный этап. Анализ деформаций неогеновых известняков вдоль этого разрыва показывает, что активность и его кинематический тип в неогене резко изменился. Наиболее интенсивные дислокации неогеновых отложений отмечаются на их контакте с юрскими базальтами. Здесь видны четкие подвороты под разрывное нарушение прослоев глинистых пород и ракушечника, залегающего в основании неогеновых отложений. В известняках прослеживаются многочисленные зеркала скольжения с бороздами и штрихами, что редко наблюдается в неогеновых известняках. Зеркала прослеживаются выше по разрезу на несколько метров, затем сменяются густой сетью крутопадающих трещин субпараллельных простиранию разрывного нарушения. Ориентировки штрихов и борозд на зеркалах в известняках неогена меняются с удалением от контакта с юрскими породами. У контакта наблюдаются сбросовые, взбросовые и сдвиговые подвижки. Через несколько метров выше по разрезу отмечаются только субгоризонтальные сдвиговые подвижки. Очевидно, в начале неогенового этапа разлом продолжал развиваться как сброс. На это указывает видимое небольшое смещение сбросового типа подошвы неогена по разрыву (рис. 3). Возможно, на этом этапе были и небольшие взбросовые подвижки. Позже развитие разрывного нарушения проходило по сдвиговому типу, на что указывают субгоризонтальные борозды и штрихи на зеркалах скольжения выше по разрезу. Эти деформации захватили и нижележащие юрские отложения, что свидетельствует о высокой интенсивности горизонтальных движений в неогене.



Рис. 3. Проявление деформаций неогеновых отложений в зоне тектонического сброса северо-западного простирания

По результатам обработки программой «Win-Tensor» зеркал скольжения, измеренных в юрских и неогеновых отложениях, построены стереограммы полей палеонапряжений (на верхнюю полусферу). В целом обработано около 50 зеркал скольжения с четко определенными направлениями подвижек. Наблюдения сгруппированы по четырем точкам наблюдения. Три точки наблюдения располагались в юрских базальтах по линии, пересекающей выше описанный сброс в северо-восточном направлении. Крайняя юго-западная точка располагалась на расстоянии 20 м от шовной зоны разрывного нарушения. Центральная точка была выбрана непосредственно в зоне разрыва, а крайняя северо-восточная точка располагалась также на удалении 20 м от него.

Четвертая точка была выбрана в неогеновых отложениях строго над центральной точкой, характеризующей юрские породы. Такое расположение точек позволяло выстроить возрастной ряд полей палеонапряжений и оценить их изменения в одновозрастных породах по латерали.

Стереограммы полученных полей палеонапряжений и их пространственное распределение показано на рис. 4.

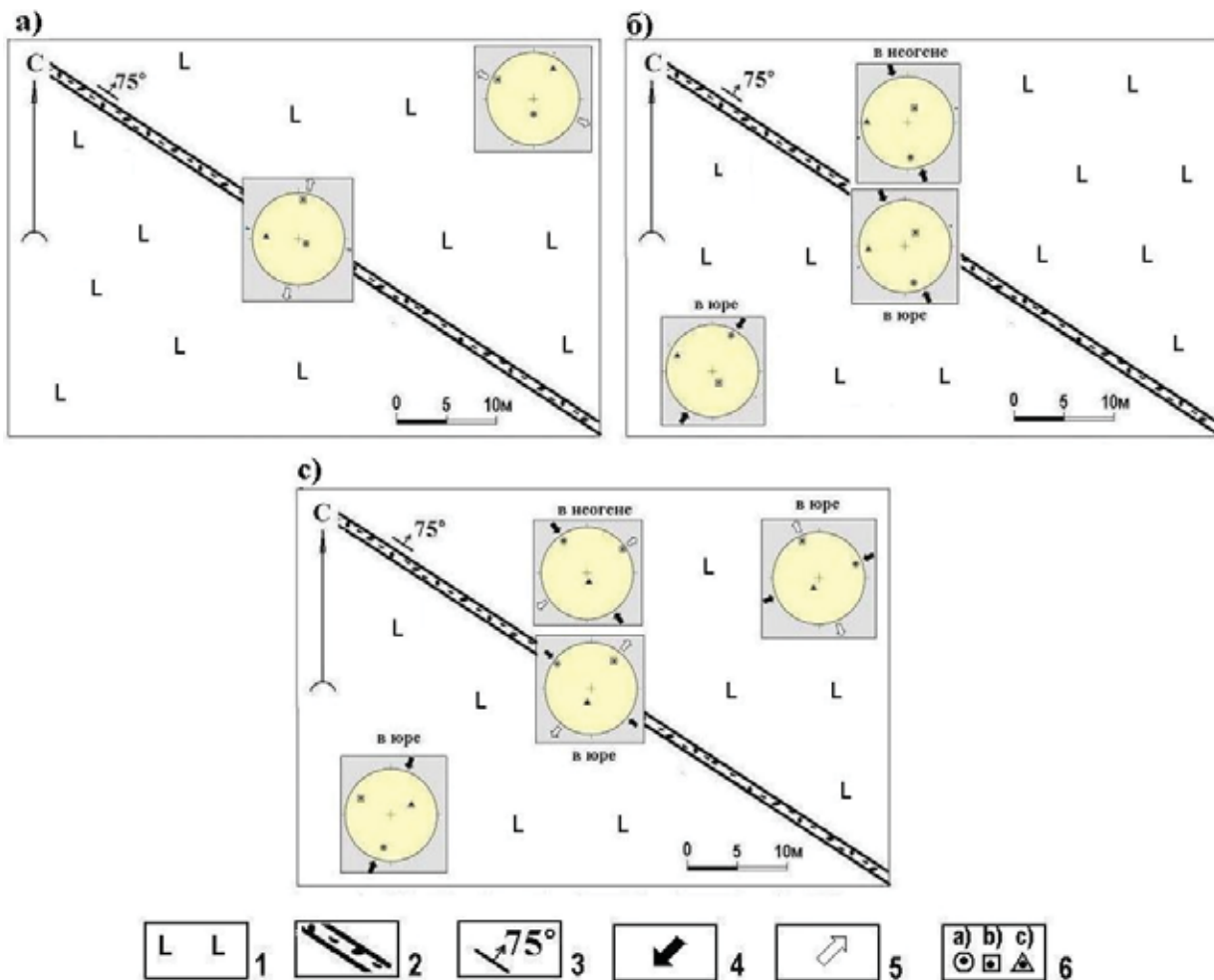


Рис. 4. Стереограммы полей напряжений в окрестностях активного сброса, деформирующего юрские вулканогенные образования и неогеновые отложения (программа «Win-Tensor»): а) сбросовое поле палеонапряжений юрского возраста; б) взбросовое поле палеонапряжений неогенового возраста; в) самое молодое сбросовое поле неоген-четвертичного возраста. 1 – базальтовые лавы средней юры; 2 – разрывное нарушение; 3 – направление падения и угол падения разрывного нарушения; 4 – активная ось сжатия ( $\sigma_1$ ); 5 – активная ось растяжения ( $\sigma_3$ ); б – главные нормальные оси полей палеонапряжений: а) сжатия ( $\sigma_1$ ), б) растяжения ( $\sigma_3$ ), в) средняя ось ( $\sigma_2$ ).

Как видно из рисунка 3 вблизи сброса установлено три типа полей: сбросовый, взбросовый и сдвиговый. Сбросовое поле наблюдается только в юрских породах, что позволяет считать это поле наиболее древним (рис. 3а). Древний возраст подтверждается и небольшим количеством

зеркал, сохранившим подвижки сбросового типа. В неогене это поле не проявило себя, или затушевано более молодыми подвижками взбросового и сдвигового типа. Ось растяжения в данном поле в зоне разрыва располагается под углом близким к  $90^\circ$  к простиранию разрыва. Именно в этом поле в юре формировался сброс с амплитудой перемещения крыльев в десятки метров. С удалением от разрыва к северо-востоку меняется положение осей, а на крайнем юго-западе это поле не зафиксировано (см. рис. 3а).

Взбросовое поле напряжений установлено как в юрских, так и неогеновых породах. При этом взбросовые поля центральной точки наблюдений юрских образований и расположенной выше точки наблюдений неогеновых пород полностью идентичны (рис. 3б). Взбросовое поле зафиксировано и к юго-западу от разрыва, но положение в пространстве осей напряжения этого поля иное. Формирование взбросового поля можно отнести к началу неогенового периода, так как выше по разрезу подвижки взбросового типа не наблюдаются.

Сдвиговое поле наиболее ярко проявлено как по латерали, так и в разрезе. Зеркала со следами субгоризонтальных подвижек развиты в большом количестве в юрских и неогеновых породах. При этом сдвиговое поле в зоне разлома на уровне юрских пород идентично сдвиговому полю, установленному в выше расположенных неогеновых отложениях (рис.3с). Эти данные позволяют отнести сдвиговое поле к наиболее молодому по возрасту. По латерали в базальтах юры с удалением от разрыва положение осей в пространстве изменяется как к юго-западу, так и к северо- востоку.

По результатам анализа изменений положения осей напряжений по латерали в разновозрастных породах можно сделать вывод, что на границах тектонических блоков представленных крупными тектоническими разрывами эти изменения наиболее резкие. Такие же явления характерны и для других регионов и хорошо описаны разными авторами.

Детальные характеристики параметров установленных полей палеонапряжений представлены в таблице 1. Кроме результатов реконструкции полей напряжений программой «Win-Tensor» в таблице приведены данные обработки зеркал скольжения программами «Fabric» и «Geos» по всем четырем точкам наблюдения. Сопоставление результатов обработки зеркал скольжения разными программами позволяет говорить о достоверности результатов интерпретации тектонофизических данных. Поля напряжений установленные разными программами по сумме зеркал в каждой точке подобны как по ориентации осей, так и по типу поля напряжения. Наибольшее совпадение отмечается между результатами обработки данных программами «Win-Tensor» и «Fabric». Данные расчета полей суммарных деформаций программой «Geos» в большинстве случаев хорошо согласуются с результатами обработки этих же данных программой «Win-Tensor» (см. табл.1).

Исследование деформаций горных пород мыса Фиолент и реконструкции полей палеонапряжений позволяют сделать ряд важных выводов. Установлено, что наибольшие деформации испытывали горные породы в средней юре, когда активно проявляла себя вулканическая деятельность. В этот период преобладали вертикальные тектонические движения. Для данного участка исследований установлено сбросовое поле палеонапряжений и развиты дайки и разрывные нарушения преимущественно северо-западного простирания. Характерны максимальные амплитуды перемещений крыльев разрывных нарушений. В начале неогена формировались деформации во взбросовом поле, но тектоническая активность была слабая. В неогене ярко проявили себя горизонтальные тектонические движения. Разрывные нарушения, заложенные в юре, в неогеновый период развивались как сдвиги. Особенно это характерно для разломов северо-западного простирания. Сбросовое поле напряжений в юрских вулканитах и признаки активности разрывных дислокаций северо-западного простирания в неогене отмечают и на других участках мыса Фиолент (А. Муровская, Р.Щербаков, 2011) [9].

Исследование изменений полей напряжений в разновозрастных породах по латерали показали необходимость учета при тектонофизических исследованиях блокового строения массива. Это особенно важно при реконструкции регионального поля напряжений по данным локальных исследований.

Сопоставление результатов работы разных программ показало, что использование нескольких программ существенно облегчает процесс интерпретации и повышает достоверность получаемых тектонофизических данных. Дальнейшие исследования по оценке качества работы разных программ обработки тектонофизических данных следует проводить с использованием эталонных выборок, отражающих типовые сбросовые, взбросовые и сдвиговые поля.

Табл. 1. Параметры полей напряжений различного возраста в окрестностях разрывного нарушения сбросового типа по данным реконструкций полей палеонапряжений различными программами.

№ п/п	№ точки наблюдения, поле	Программа, число зеркал скольжения	Азимут падения/угол падения осей напряжений (деформаций)			Активная ось	Тип поля напряжений	Структурная позиция, деформированные породы
			$\sigma_1$ (S <sub>1</sub> )	$\sigma_2$	$\sigma_3$ (S <sub>3</sub> )			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	557a	Fabric, 14	137/7	196/71	222/14		сдвиговый	Зона сброса, базальты юры
2	557a	Geos (деформации), 14	331/8		234/40		взбросо-сдвиговый	Зона сброса, базальты юры
3	557a	Win-Tensor, 14	142/1	237/78	52/12		сдвиговый	Зона сброса, базальты юры
4	557a, Поле 1	Win-Tensor, 6	301/68	94/20	187/9	$\sigma_3$	сбросовый	Зона сброса, базальты юры
5	557a, Поле 2	Win-Tensor, 7	346/20	85/22	218/59	$\sigma_1$	взбросовый	Зона сброса, базальты юры
6	557a, Поле 3	Win-Tensor, 12	126/10	15/64	220/24	$\sigma_1, \sigma_3$	сдвиговый	Зона сброса, базальты юры
7	557б	Fabric, 11	138/10	182/71	222/11		сдвиговый	Зона сброса, известняки неогена
8	557б	Geos (деформации), 11	146/6		238/16		сдвиговый	Зона сброса, известняки неогена
9	557б	Win-Tensor, 11	330/5	66/53	236/37		взбросо-сдвиговый	Зона сброса, известняки неогена
10	557б, Поле 1	Win-Tensor, 5	355/25	91/13	206/61	$\sigma_1$	взбросовый	Зона сброса известняки неогена
11	557б, Поле 2	Win-Tensor, 5	144/15	349/74	236/7	$\sigma_1, \sigma_3$	сдвиговый	Зона сброса известняки неогена
12	559	Fabric, 17	25/10	54/84	118/0		сдвиговый	20м на юго-запад от разлома, базальты юры
13	559	Geos, деформации, 17	25/16		119/14		сдвиговый	20м на юго-запад от разлома, базальты юры
14	559	Win-Tensor, 17	20/9	229/80	111/5		сдвиговый	20м на юго-запад от разлома, базальты юры
15	559, Поле 1	Win-Tensor, 5	208/14	113/19	331/66	$\sigma_1$	взбросовый	20м на юго-запад от разлома, базальты юры

Продолжение табл.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	559, Поле 2	Win- Tensor, 11	13/29	243/49	119/26	$\sigma_1$	сдвиговый	20м на юго-запад от разлома, базальты юры
17	559a	Fabric, 11	242/24	217/61	161/12		сдвиговый	20м на северо- восток от разлома, базальты юры
18	559a	Geos, дефор- мации, 11	239/0		149/32		взбросо- сдвиговый	20м на северо- восток от разлома, базальты юры
19	559a	Win- Tensor, 11	249/27	12/47	141/31		взбросо- сдвиговый	20м на северо- восток от разлома, базальты юры
20	559a, Поле 1	Win- Tensor, 6	359/63	214/23	118/14	$\sigma_3$	сбросовый	20м на северо- восток от разлома, базальты юры
21	559a, Поле 2	Win- Tensor, 5	249/15	27/70	156/13	$\sigma_1, \sigma_3$	сдвиговый	20м на северо- восток от разлома, базальты юры

Примечание:  $\sigma_1$  – ось сжатия,  $\sigma_2$  – средняя ось,  $\sigma_3$  – ось растяжения

### Библиографический список

1. Борисенко, Л. С. Геодинамика Крымско-Черноморского региона как следствие многоуровневого тектогенеза / Л. С. Борисенко, Л. Г. Плахотный // Геодинамика Крымско-Черноморского региона: Сб. материалов конф. – Симферополь, 1997. – С. 54–64.
2. Геологическая карта Горного Крыма масштаба 1:200 000 А. М. / С. В. Пивоваров; под редакцией Деренюка Н. Е. – Симферополь, 1984.
3. Юдин, В. В. Гераклеийская антиклиналь юго-западного Крыма / В. В. Юдин // Геодинамика и нефтегазоносные структуры Черноморско-Каспийского региона. – Симферополь, 2002. – С. 212–213.
4. Казанцев, Ю. В. Тектоника Крыма / Ю. В. Казанцев. – М.: Наука, 1982. – 112 с.
5. Angelier J. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits / J. Angelier, P. Mechler // Bull. Soc. Géol. France, 1977. –19:1309-1318.
6. Delvaux, D. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TeNSOR program / D. Delvaux, B. Sperner // Geological Society, London, Special Publications. – 2003. – 212. – P. 75–100.
7. Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений / О.И. Гущенко // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 225, № 3. – С. 557–560.
8. Тектонический стресс-мониторинг и поля напряжений Причерноморского региона / О.И. Гущенко, Н.Ю. Гущенко, А.О. Мострюков [и др.] // Наук. праці ДонНТУ. Сер. гірничо-геологічна. – 2001. – Вип. 32. – С. 104–117.
9. Муровская А.В. Структурно-кинематические парагенезисы и деформационные режимы Гераклеийского блока юго-западного Крыма / А.В. Муровская, Р.Н. Щербаков // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна. – 2011. – Вип. (13)178. – С.122– 128.

Поступила в редакцію 22.12.11.



В.І. Альохін

*Донецький національний технічний університет, Донецьк, Україна*

### Деформації гірських порід і результати реконструкцій полів палеонапруг мису Фіолент (південно-західний Крим) за новими тектонофізичними даними

Показані результати структурно-геологічних і тектонофізичних досліджень на ділянці західного обмеження мису Фіолент. Встановлені численні крутопадаючі дайки і жили північно-західного простягання, які січуть вулканогенні утворення середньої юри. Досліджені розривні тектонічні порушення, що деформують юрські вулканогенні породи і вапняки неогену. У юрських і неогенових дислокованих утвореннях проведені реконструкції полів напруги і деформацій, встановлені їх параметри, а також особливості їх просторового розподілу. Досліджені умови формування розривних дислокацій на різних етапах їх розвитку.

Ключові слова: деформації, напруги, дайки, жили, розривні дислокації, базальти, вапняки.

V. I. Alyohin

*Donetsk national technical university, Donetsk, Ukraine*

### Deformations of rocks and results of reconstructions of the fields of paleostress of Fiolent cape (south-west Crimea) on new tektonophysical data

Results of structural-geological and tektonophysical researches on the area of western limitation of Fiolent cape are presented. The numerous steeply dipping dikes and veins of the north-western extending, secant volcanic formations of middle jurassic are set. Disjunctive dislocations, which deform jurassic volcanic rocks and limestones of Neogene, are investigated. The reconstructions of the fields of tensions and deformations in the jurassic and neogene strained rocks have been executed, their parameters, and also features of their spatial distributing, are set. The conditions of forming of rupture dislocations on the different stages of their development are investigated

Keywords: deformations, tensions, dikes, veins, rupture dislocations, basalts, limestones.