

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3, 2022

Активная тектоника Восточной Арктики: новые данные геолого-геофизических исследований на мысе Фомы (запад острова Врангеля) <i>А. Н. Овсяченко, Д. Е. Едемский, Р. А. Жостков</i>	3
Структура земной коры северо-востока Алданской антеклизы Сибирской платформы и алмазоносность <i>Г. А. Стогний, В. В. Стогний</i>	20
Радиально-концентрические структуры в фундаменте древней платформы и условия возникновения очагов генерации углеводородов: реконструкция по сейсмотектоническим данным <i>Е. А. Данилова</i>	36
Напряженное состояние земной коры Западного Тянь-Шаня в Центральной Азии (Узбекистан): математическое моделирование <i>И. У. Атабеков, Ю. М. Садыков</i>	50
Правила представления статей в журнал “Геотектоника” (<i>Geotectonics</i>)	66

Contents

Vol. 56, no. 3, 2022

Active Tectonics of the Eastern Arctic: New Data from Geological and Geophysical Studies at Cape Thomas (West of Wrangel Island) <i>A. N. Ovsyuchenko, D. E. Edemsky, R. A. Zhostkov</i>	3
Structure of the Earth's Crust in the Northeast of the Aldan Antecline (Siberian Platform): Diamond Potential <i>G. A. Stogny, V. V. Stogny</i>	20
Radial-Concentric Structures in the Basement of an Ancient Platform and Conditions for the Occurrence of Hydrocarbon Generation Centers: Reconstruction from Seismotectonic Data <i>E. A. Danilova</i>	36
Stress Regime of the Earth's Crust in the Western Tien Shan in Central Asia (Uzbekistan): A Mathematical Model of Stresses <i>I. U. Atabekov, Yu. M. Sadykov</i>	50
Guidelines to Preparing and Submitting a Manuscript to "Геотектоника"/Geotectonics	66

УДК 550.311

АКТИВНАЯ ТЕКТОНИКА ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ: НОВЫЕ ДАННЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЫСЕ ФОМЫ (ЗАПАД ОСТРОВА ВРАНГЕЛЯ)

© 2022 г. А. Н. Овсюченко¹, Д. Е. Едемский², Р. А. Жостков^{1, *}¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
д. 10, Б. Грузинская ул., 123995 Москва, Россия²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), д. 4, Калужское шоссе, 108840 Москва, Троицк, Россия

*e-mail: shageraxcom@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2022 г.

После доработки 25.04.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2022 г.

Представлены результаты первых комплексных геолого-геофизических исследований активной тектоники в западной части острова Врангеля, выполненных в ходе экспедиции Северного флота РФ и Русского географического общества в 2020 г вдоль трассы Северного морского пути на ледоколе “Илья Муромец”. Изученный нами уступ на мысе Фомы имеет тектоническую природу и представляет собой активный разлом субширотного простирания, по которому в современную геологическую эпоху происходили неоднократные подвижки, реализующие надвигание горного хребта на приморскую низменность. В отличие от палеозойско–мезозойских структур южного падения, активный взбросо-надвиг имеет северное падение и отражает смещение горной цепи с севера на юг. Проведенные исследования позволяют обоснованно полагать, что вдоль границы растущего тектонического блока Западного плато и Южной приморской низменности острова Врангеля протягивается потенциальный очаг сильных землетрясений. Полученные данные существенно уточняют имеющиеся сведения о динамике и кинематике молодых тектонических движений на острове Врангеля, но входят в противоречие с низкой активностью по сейсмологическим данным. Сделано предположение, что в настоящее время потенциальный очаг находится в стадии сейсмического затишья.

Ключевые слова: активная тектоника, палеосейсмология, сеймотектоника, георадар, сейсмическая опасность, очаг землетрясения, Арктика, остров Врангеля

DOI: 10.31857/S0016853X22030055

ВВЕДЕНИЕ

Современная тектоническая активность и сейсмическая опасность Арктического региона, за редкими исключениями, до недавних пор исследовалась с резким преобладанием роли инструментальных сейсмологических данных. До 1950-х гг. во всем Арктическом регионе функционировали только три международных стационарные сейсмические станции. Уровень минимальной магнитуды землетрясений, регистрируемых без пропуска данными станциями, составлял $M = 5.5–6$ [1].

Только в 1950-х годах в регионе установлены три первые отечественные стационарные сейсмические станции: ст. Апатиты и ст. Тикси в 1956 г., ст. Хейс в 1957 г., к 1990-му году количество действующих сейсмических станций было увеличено до девяти, расстояния между станциями и в настоящее время составляют сотни и тысячи километров.

Таким образом, данные о землетрясениях Восточной Арктики имеются за последние 70 лет. Информация за столь небольшой отрезок времени позволяет составить представления о сейсмичности и современной тектонической активности в общих чертах, а открытие каждой новой станции вносит существенные коррективы в представления о распределении сейсмоактивных зон [28].

По этой причине особую важность приобретают палеосейсмологические исследования. Не смотря на современное бурное развитие палеосейсмологического метода, в российской Арктике такие исследования проводились, в основном, на Кольском п-ове, фрагментарно в районе устья р. Лена, на самом севере Верхоянского горного сооружения, на арх. Северная Земля и на побережье Таймырского п-ова [10, 14–16, 20, 22, 24, 29].

Целью статьи является анализ результатов первых геолого-геофизических исследований ак-



Рис. 1. Обзорная карта Восточной Арктики (цифровая модель рельефа, по [52]). Показано (квадрат черным) положение региона исследования.

тивной тектоники и следов сильных землетрясений на острове Врангеля, выполненных в 2020 г. в ходе Комплексной экспедиции Северного флота РФ и Русского географического общества вдоль трассы Северного морского пути на ледоколе “Илья Муромец”. Исследования были проведены в западной части острова Врангеля, в районе мыса Фомы (рис. 1).

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Остров Врангеля расположен в центральной, наиболее приподнятой части сводово-блоковой структуры, в пределах которой протерозойский фундамент палеозойско-мезозойских складчатых структур выведен на поверхность [4, 5, 18, 19, 31]. Сложно деформированный осадочный чехол острова имеет складчато-надвиговое строение при общем субширотном простирании структур [5, 8, 18, 19, 31, 36].

В составе чехла выделяется несколько структурно-вещественных комплексов — от терригенно-карбонатного позднесилурийско-среднедевонско-

го до турбидитового поздне триасового [18, 32]. Западная часть острова Врангеля, где были проведены наши исследования, сложена толщей поздне триасовых терригенных турбидитов, которые характеризуются ритмичным переслаиванием темных песчаников, алевролитов и глинистых сланцев.

Остров имеет горный рельеф с абсолютными высотами до 1096 м. Горы вытянуты цепью в центральной части острова, а на севере и юге сменяются полого-наклонными приморскими равнинами с берегами лагунного типа [36]. Наиболее крупные лагуны расположены на северном побережье. Долины крупных рек на приморских равнинах имеют широкие меандрирующие мелководные русла и террасы высотой 0.5–1.5 м, сложенные галечно-гравийным материалом с крупнозернистым песком [18].

В горной части распространены антецедентные долины с крутыми ($\angle 30^\circ$ и более), часто обнаженными склонами и узкими днищами, сложенными грубообломочными отложениями малой мощности. Цокольные террасы высотой до 5 м

с маломощным покровом аллювиальных отложений свидетельствуют о молодом поднятии горной цепи. Амплитуда воздымания на этапе активизации неотектонических движений (поздний плейстоцен—голоцен) определена от 50 м до 250 м [3].

В западной части острова, где расположен район исследований, горная цепь представлена западным плато и срезается берегом моря. Отличительной особенностью рельефа западного плато является единый денудационный уровень вершинных поверхностей с абсолютными высотами 400—500 м.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На острове Врангеля выполнены палеосейсмологические исследования, георадарное профилирование и аэрофотосъемка с построением цифровой модели рельефа.

Палеосейсмологические исследования направлены на получение сведений о молодых сеймотектонических деформациях и сильнейших землетрясениях для регионов с непродолжительным периодом инструментальных сейсмологических наблюдений и ограниченными историко-сейсмологическими данными.

Исследования основаны на фактах обнаружения в эпицентральных зонах современных землетрясений многочисленных следов древних сейсмических катастроф — палеосейсмодислокаций [34, 35, 40]. Это положение имеет фундаментальное значение в прогнозе сейсмических катастроф, т.к. по следам палеоземлетрясений возможно выявление очагов сильных землетрясений будущего. Основная задача таких исследований сводится к выявлению и изучению всех возможных следов сейсмогенной активизации в молодых отложениях и формах рельефа, привязываемых к зонам активных разломов [26, 47].

Идентификация сейсмических очагов наиболее однозначна при выявлении сеймотектонических разрывов, маркирующих собой выход очага сильного землетрясения на поверхность. Параметризация сеймотектонических разрывов для определения характеристик очагов палеоземлетрясений возможна в случае выявления следов импульсных смещений дневной поверхности относительно недалекого прошлого в естественных или искусственных обнажениях (трэнчинг).

Однако в условиях сурового арктического климата и широкого развития криогенных процессов (солифлюкции, десерпции, нивации и др.) выявление подобных структур осложняется быстрой нивелировкой рельефа очень подвижным, сезонно оттаивающим склоновым чехлом, подповерхностным смывом мелкозема в результате сезонного таяния мерзлоты, морозобойным трещинообразованием, а также постоянным перемещением

обломков скальных пород в результате промерзания—оттаивания [30, 33].

Высокая подвижность приповерхностного слоя быстро маскирует как опорные геоморфологические уровни голоценового возраста, используемые для выявления и возрастной привязки тектонических деформаций, так и первичные структурно-текстурные признаки в слоистых осадках, маркирующих собой эти структуры.

Перечисленные обстоятельства, наряду с небольшой мощностью сезонно-талого слоя (СТС), затрудняют применение стандартных методов изучения активных разломов и палеосейсмодислокаций, однако сложности решаются с использованием геофизических методов.

Разрез молодых отложений на участках предполагаемых молодых тектонических деформаций изучен методом георадарного профилирования прибором повышенной мощности “Лоза-В” (ООО “Компания ВНИИСМИ, г. Москва, Россия [49]).

В ряде работ [7, 11–13, 44, 45] приведены результаты применения данных приборов для решения различных геологических задач. Профилирование выполнено антеннами с центральной частотой 50 МГц и шагом по профилю 0.5 м.

При интерпретации принимались во внимание особенности волновой картины в зонах предполагаемых разломов, наличие разрывов осей синфазности с их смещением или изменением угла наклона по линиям разлома, изменение мощности георадарных комплексов и амплитуды отраженных сигналов по мере приближения к линии разлома. Наличие резких изменений направления осей синфазности, их разрывы, могут свидетельствовать о нарушении субгоризонтальной структуры среды и наличия тектонических разрывов и смещений.

При заложении геофизических профилей был использован основной принцип изучения активных разломов, который опирается, в первую очередь, на прослеживание опорных геоморфологических уровней позднеплейстоцен—голоценового возраста и слагающих их осадков. Такой временной интервал, т.е. последние 100—130 тыс. лет, предопределяет методические принципы исследования — выявление и детальное изучение деформаций отложений и форм рельефа соответствующего возраста [37].

Для этого необходим выбор мест, лишенных факторов, которые скрывают, искажают или подменяют проявления молодых тектонических смещений по разломам. Наиболее предпочтительными являются поверхности накопления слоистых позднеплейстоцен-голоценовых отложений, маркирующих собой опорные уровни, используемые для возрастной привязки деформаций [41].



Рис. 2. Аэрофотоснимки (различные ракурсы) предгорного уступа, отделяющего горный массив Западного плато от приморской низменности на мысе Фомы острова Врангеля. Показан (стрелка черным) предгорный уступ.

Аэрофотосъемка проводилась с использованием квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro (SZ DJI Technology Co., Ltd., Китай) с высоты 500 м над уровнем моря. Построенная при обработке 576 фотографий в отечественном программном пакете Agisoft Metashape [50] цифровая модель рельефа позволила определить морфологию и количественные параметры проявлений молодых тектонических деформаций в рельефе.

Использование полученных на месте с помощью беспилотного летательного аппарата и других дистанционных данных основано на морфологических методах — прежде всего выявление линейных зон (уступов, рвов, валов и т.п.), секущих и смещающих молодые формы рельефа [37, 41].

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В районе мыса Фомы к берегу моря подходит предгорный уступ, отделяющий Западное плато от Южной приморской низменности (рис. 2). Западное плато представляет собой структурно-денудационный среднегорный массив с яркой нивационно-мерзлотной обработкой поверхности — здесь наблюдается сплошной покров очень подвижных каменных россыпей с нагорными террасами на склонах и выположенным вершинным уровнем. С запада плато обрывается в море скалистым выступом мыса Фомы, с юга — крутым уступом общей высотой ~400 м, представ-

ляющим собой резкую морфологическую границу горного массива с пологой наклонной приморской низменностью.

Южная приморская низменность имеет сглаженный, равнинный рельеф, сложена маломощным покровом солифлюкционно-озерно-болотных отложений, покрыта густой эрозионной сетью, заболоченными участками и редкими отдельными фрагментами древних морских террас. Возраст морских террас оценивается как средне-позднеплейстоценовый [4].

Вблизи среднегорного массива Западного плато бассейновые отложения морских террас сменяются позднеплейстоцен-голоценовым пролювиально-солифлюкционным шлейфом, прилегающим к предгорному уступу.

Предгорный уступ, представленный резким перегибом склонов горного массива и речных долин, извилисто вдаётся вглубь горного массива в долинах водотоков и выступает в сторону прилегающей низменности на гребнях отрогов. Такая морфология характерна для поверхностного выражения пологих разломов взбросо-надвигового типа, по которым происходит горизонтальное сжатие в сочетании с вертикальными смещениями [41, 47].

Уступ приурочен к фронтальной части принадлежливой зоны интенсивного смятия коренных пород турбитового комплекса. В прибрежном обрыве обнажается толща ритмичного переслаивания преобладающих черных глинистых сланцев с алевролитами и темно-серыми мелкозернистыми песчаниками. По фаунистическим данным эти отложения отнесены к позднему триасу [36].

Подшва слоев песчаников (мощностью до 0,6 м) имеет линейно-бугристую поверхность, характерную для мутьевых потоков, по положению которой восстанавливается общее опрокинутое залегание слоев. Можно полагать, что здесь расположено крыло крупной опрокинутой антиклинальной складки.

Вблизи уступа северное крыло крупной опрокинутой антиклинали осложнено многочисленными взбросо-надвигами северного падения, реже сбросами обратного (южного) падения и узкими, межразломными гребневидными складками вочления (рис. 3).

Тектонические разрывы сопровождаются мощными (до 1 м) кварцевыми жилами с мелкими (до 5 см) кристаллами горного хрусталя и вкрапленной рудной минерализацией (молибденит). В основании наблюдаемого разреза прослеживается субгоризонтальный извилистый разрыв надвигового типа, выходящий к подножию предгорного уступа. Можно полагать, что южное крыло крупной, опрокинутой на юг, антиклинальной складки разорвано крупным надвигом.

Уступ прорезан небольшой долиной временно-водотока, которая ниже пересечения с уступом отложила конус выноса грубообломочного материала селевых потоков, образовав наземную дельту. Такая обстановка маркирует местный базис эрозии, который разделяет участки врезания долины (поднятия) и отложения образуемых осадков (опускания). Базис эрозии, таким образом, оказался смещен от его нормального положения у берега моря к предгорному уступу. Расположение здесь местного базиса эрозии и резкая смена условий современного осадконакопления свидетельствуют о молодом подрастании Западного плато вдоль предгорного уступа. На левом борту долины гребень отрога рассечен дугообразными цирками отрыва двух небольших, разновозрастных скальных оползней шириной ~300 м, выдвинувшихся в приморскую низменность на 30–40 м (рис. 4).

На гребне отрога, вытянутого вдоль простирания уступа, наблюдаются рвы и уступы. Скорее всего, они приурочены к разрывам в коренных породах. В то же время, эти нарушения закономерно затухают на склонах привершинных участков гор, что исключает их первично тектоническую природу (рис. 5).

Они развиты исключительно на водоразделах, следовательно имеют закономерную геоморфологическую позицию и, по всей видимости — приповерхностные, т.е. не проникающие глубже местного базиса эрозии (рис. 6).

Таким образом, уступ имеет тектоническую природу и обнаруживает разнообразные геоморфологические признаки молодой активности.

ГЕОРАДАРНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

С целью изучения внутреннего строения уступа, вкост его простирания, проложено три георадарных профиля (см. рис. 4, см. рис. 5, см. рис. 6). Профиль 1 пройден в днище долины временно-водотока на поверхности грубообломочных пролювиальных (селевых) накоплений. Профили 2, и 3 проложены в нижней, наиболее крутой части предгорного уступа, на контакте с пологой поверхностью солифлюкционного шлейфа приморской низменности. Длина проложенных профилей составила 213, 96 и 54 м соответственно (рис. 7).

Анализ волновой картины профилей 1, 2, и 3 показал наличие трех ярко выраженных георадарных комплексов 1, 2, и 3, границы между которыми проведены по линиям изменения морфологии осей синфазности и их интенсивности [6] (см. рис. 7). Для преобразования георадарных разрезов из временно-масштаба в масштаб глубин и оценки глубины залегания отдельных элементов разреза, можно применить усредненную скорость распространения электромагнитной волны $V = 0.11$ м/нс, которая получена в результате анали-

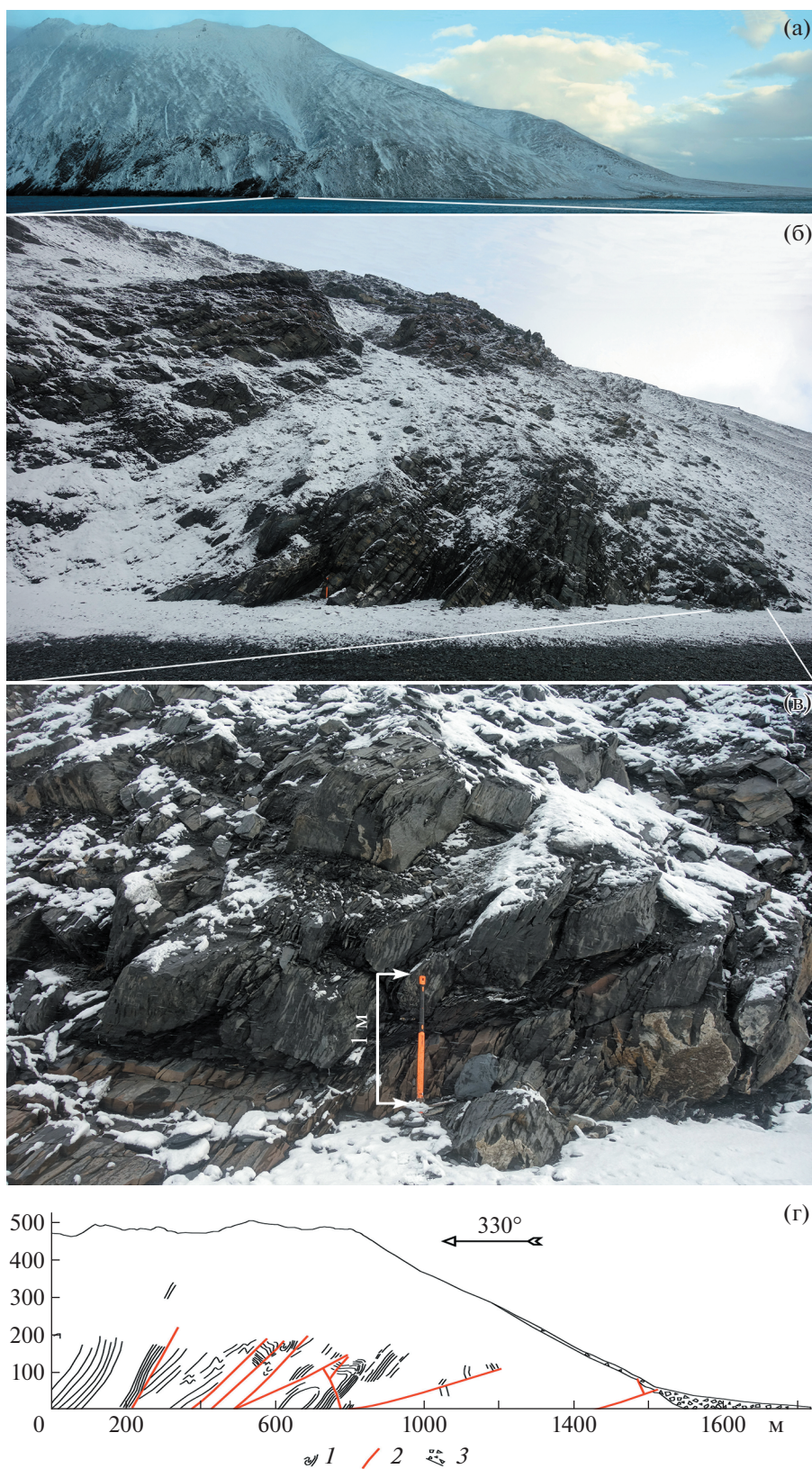


Рис. 3. Строение прибрежного обрыва на мысе Фомы острова Врангеля. (а) – общее фото мыса Фомы; (б)–(в) – детали фото различных участков обрыва (положение показано на (б) белыми линиями); (г) – схематичный структурно-геологический разрез. 1 – переслаивание сланцев, алевролитов и песчаников (поздний триас); 2 – тектонические разрывы; 3 – поздне-четвертичные грубообломочные отложения



Рис. 4. Общий вид тектонического уступа (показан стрелками). Георадарные профили 1–1', 2–2', 3–3'.
1 – стенки отрыва оползней; 2 – скальные оползни

за георадарных профилей, отражений зондирующего импульса от локальных объектов.

Изменение вдоль профиля мощности георадарных комплексов и их электромагнитных параметров, о чем свидетельствует неравномерный волновой рисунок отражений комплексов вдоль профиля, а также, наличие неравномерного по мощности и электромагнитных свойствам влагонасыщенного сезонно-талого слоя вдоль пологого склона – все это не делает возможным корректно представить георадарные разрезы в масштабе глубин.

Во всех профилях верхняя часть георадарного разреза имеет довольно четкую субгоризонтальную стратификацию. Субгоризонтальная структура линий синфазности георадарного комплекса 1 представляет собой толщу переслаивания пачек склоновых отложений (см. рис. 7). Мощность данного комплекса вдоль профиля предположительно колеблется от 3 м до 6 м с увеличением мощности к концу профиля.

Ниже кровли георадарного комплекса 2, разрез приобретает характерный нерегулярный волновой рисунок отражений и представляет собой чехол пролювиальных или солифлюкционных отложений (см. рис. 7). Для него характерно отсутствие регулярной структуры и наличие множественных локальных неоднородностей, что может свидетельствовать о существенной примеси грубообломочного материала. Георадарный комплекс 3 на всех профилях выделяется характерным рисунком ритмичного переслаивания пачек коренных пород (см. рис. 7).

В результате анализа, на георадарном разрезе выявлены разрывы осей синфазности с их смещением или изменением угла наклона по субвертикальным линиям разрыва (см. рис. 7, штрих-линии красным). Подножию уступа четко соответствует разрыв, или серия разрывов, падающих под углом ~15°–20° в северном направлении. Разрывы проникают в чехол молодых отложений, подошве которого наблюдаются сдвиги раз-

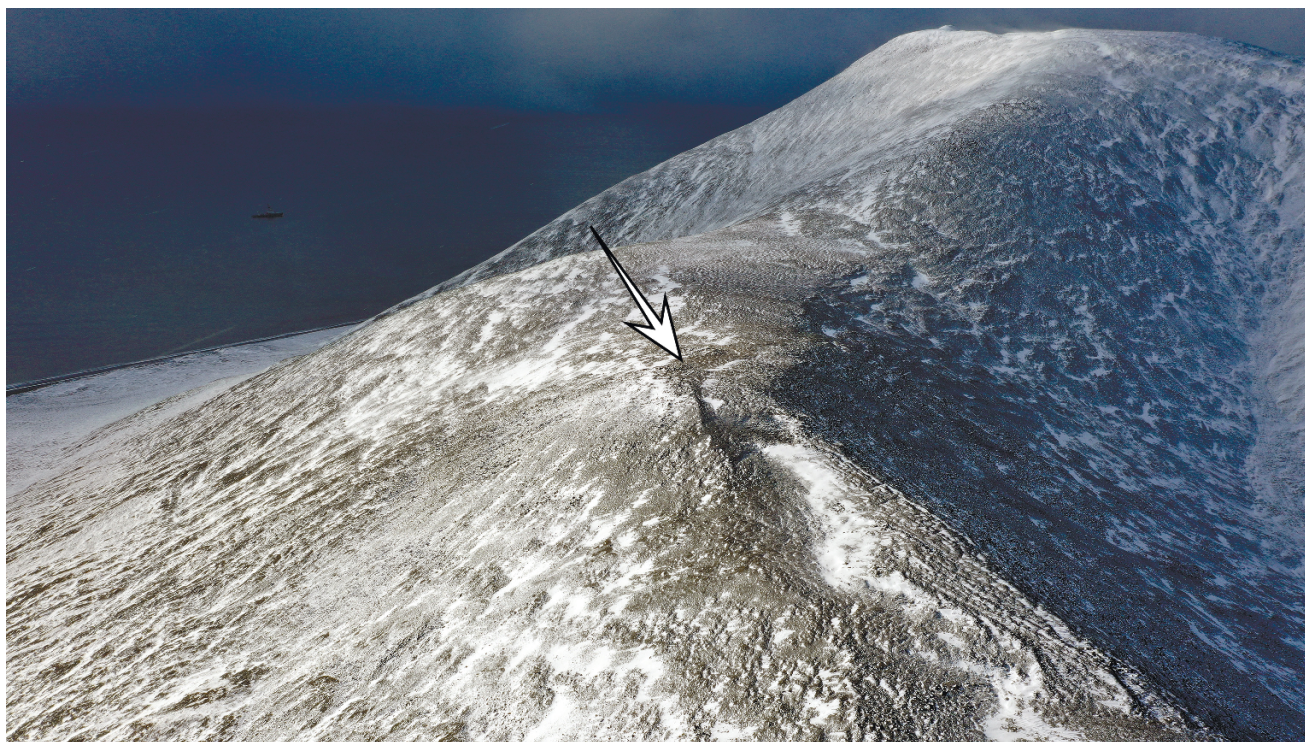


Рис. 5. Привершинные рвы и уступы на гребне отрога (показаны стрелкой).

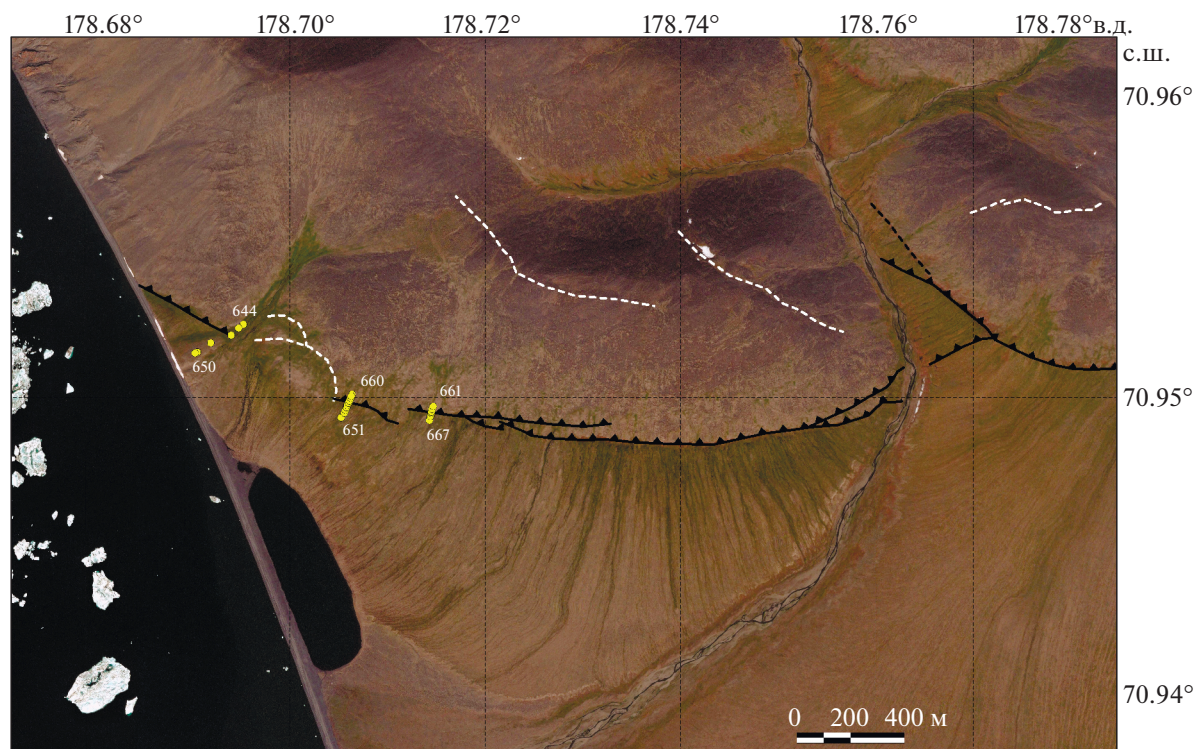


Рис. 6. Схема взбросо-надвиговых уступов (линии белым), сейсмогравитационных и гравитационно-сеймотектонических нарушений с положением точек георадарного профилирования (кружки желтым) в районе мыса Фомы на космоснимке высокого разрешения (получен с использованием Esri ArcGIS Desktop [51]).

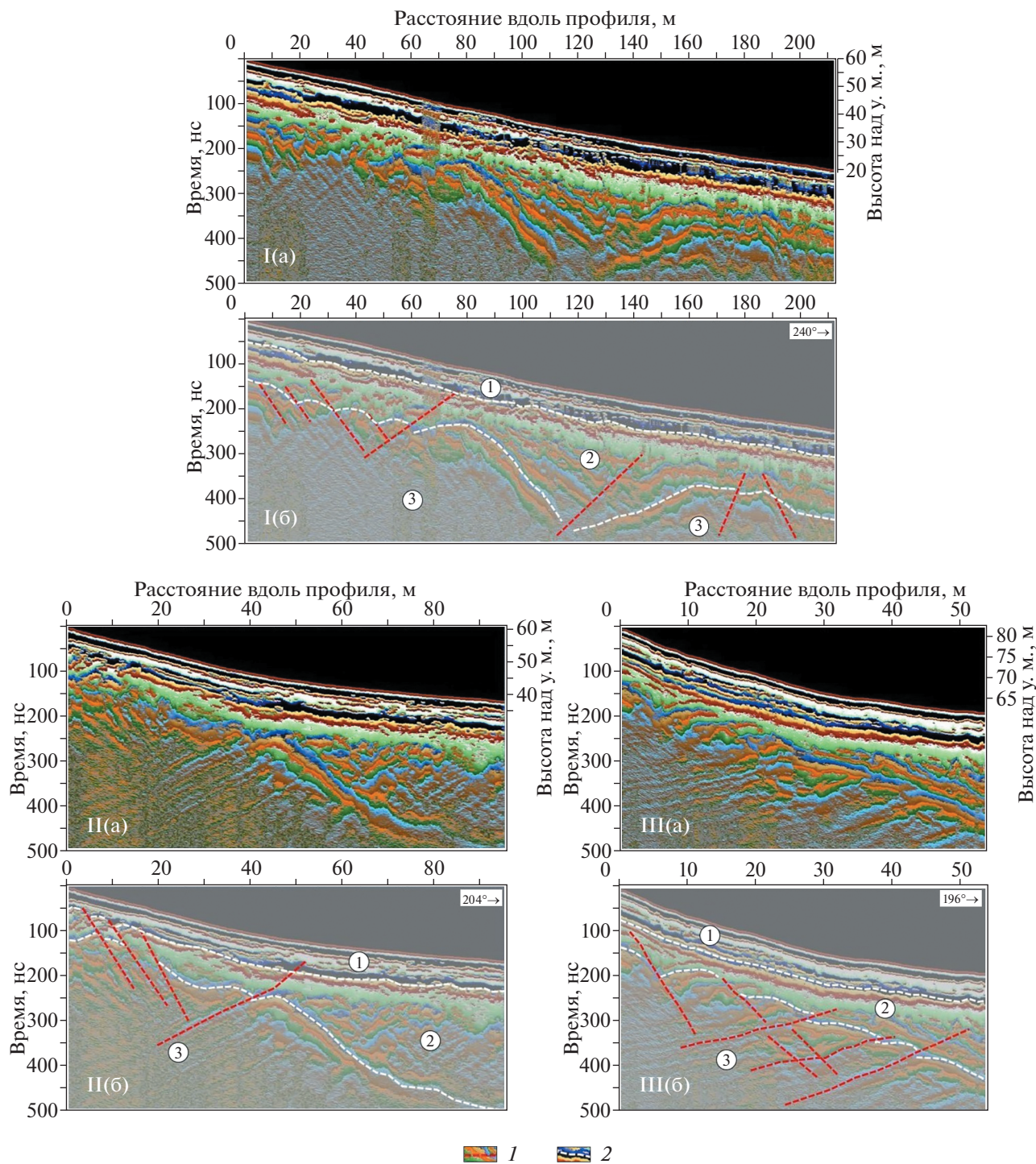


Рис. 7. Георадарные профили.

Обозначено: I (а–б) – профиль 1; II (а–б) – профиль 2; III (а–б) – профиль 3.

Обозначены (цифры в кружках) номера георадарных комплексов. 1 – тектонические разрывы (пунктир красным); 2 – границы георадарных комплексов (пунктир белым)

реза, наиболее отчетливо проявленное на профиле 2 (см. рис. 7, II). Надвиги сопровождаются оперяющимися сбросами – структурами компенсационного растяжения в надвинутом крыле, которые также смещают чехол рыхлых отложений.

На профиле 1 разрывы пересекаются (см. рис. 7, I). Можно предположить, что пересекающиеся разрывы являются разновозрастными и образовались при разных импульсных подвижках. При этом, самый молодой из разрывов –

нижний надвиг, проникающий в самые молодые слои разреза, с опережающими его сбросами в на-
двинутом крыле.

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Восточнее изученного участка на космоснимках прослеживается целая система предполагаемых сеймотектонических нарушений, аналогичных изученному уступу на мысе Фомы (рис. 8, рис. 9).

Выделяемые на космоснимках нарушения имеют значительную протяженность (десятки – сотни метров), секут разнородные формы рельефа и образуют структурные парагенезы типичные для тектонических деформаций, что отличает их от мерзлотных, гравитационных и других приповерхностных (экзогенных) трещин или нивационных ниш, характерных для условий вечной мерзлоты и сурового арктического климата.

Структурные парагенезы представлены закономерным сочетанием субширотных уступов и диагональных разрывов северо-западной ориентировки.

Система нарушений образована в основном субширотными уступами и диагональными разрывами северо-западной ориентировки.

Разрывы субширотной ориентировки, по всей видимости, аналогичны уступу, изученному на мысе Фомы и имеют взбросо-надвиговую кинематику смещений. Чаще всего они выражены уступами, отделяющими горные гряды от низменностей, или линейными поднятиями на поверхности предгорных шлейфов. Эти линейные нарушения выражены на поверхности весьма подвижного и молодого солюфлюкционного чехла, покрывающего предгорные шлейфы и днища долин водотоков, что говорит о возрасте нарушений в первые сотни лет. В северных крыльях взбросо-надвигов наблюдаются приподнятые участки с признаками деградации болот в результате осушения. Здесь же расположены врезанные русла, которые ниже уступов растекаются в виде обширных конусов.

Диагональные разрывы чаще всего представлены линейными, заболоченными рвами. В некоторых случаях по ним устанавливаются горизонтальные (левосдвиговые) смещения долин водотоков и скальных гребней.

Таким образом, возможно, что очаг землетрясения имеет значительную протяженность, кото-

рую еще предстоит выяснить, определив и магнитуду палеоземлетрясения. По дистанционным данным разрывы на о. Врангеля объединяются в две основные системы в южной и центральной частях острова (см. рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проявления молодых тектонических движений на о. Врангеля подтверждались сведениями общего характера, однако о. Врангеля неоднократно испытывал значительные перестройки гидросети и позднеплейстоцен-голоценовые движения различного знака, определившие общий морфоструктурный облик острова [4, 36].

Амплитуда воздымания на этапе активизации неотектонических движений в позднем плейстоцене–голоцене оценена от 50 м до 250 м, а линейно вытянутые сгущения изолиний равных амплитуд приурочены к блокоразделяющим разломам (зонам) с большими градиентами смещений [3]. Ряд признаков рассматривался, как свидетельства продолжающегося в настоящее время прерывистого молодого тектонического поднятия о. Врангеля [17]:

- наращивание аккумулятивных берегов вследствие заполнения осадками лагун и заливов;
- серии береговых валов, высота которых убывает с приближением к морю;
- растущие наземные дельты; террасы с реликтовыми опресненными озерами-лагунами на их поверхности;
- плавник, найденный в удалении от моря на разных высотах.

Имеющиеся данные о высокой современной тектонической активности острова входят в противоречие с сейсмологическими данными – на инструментальном этапе наблюдений остров Врангеля является низко активным.

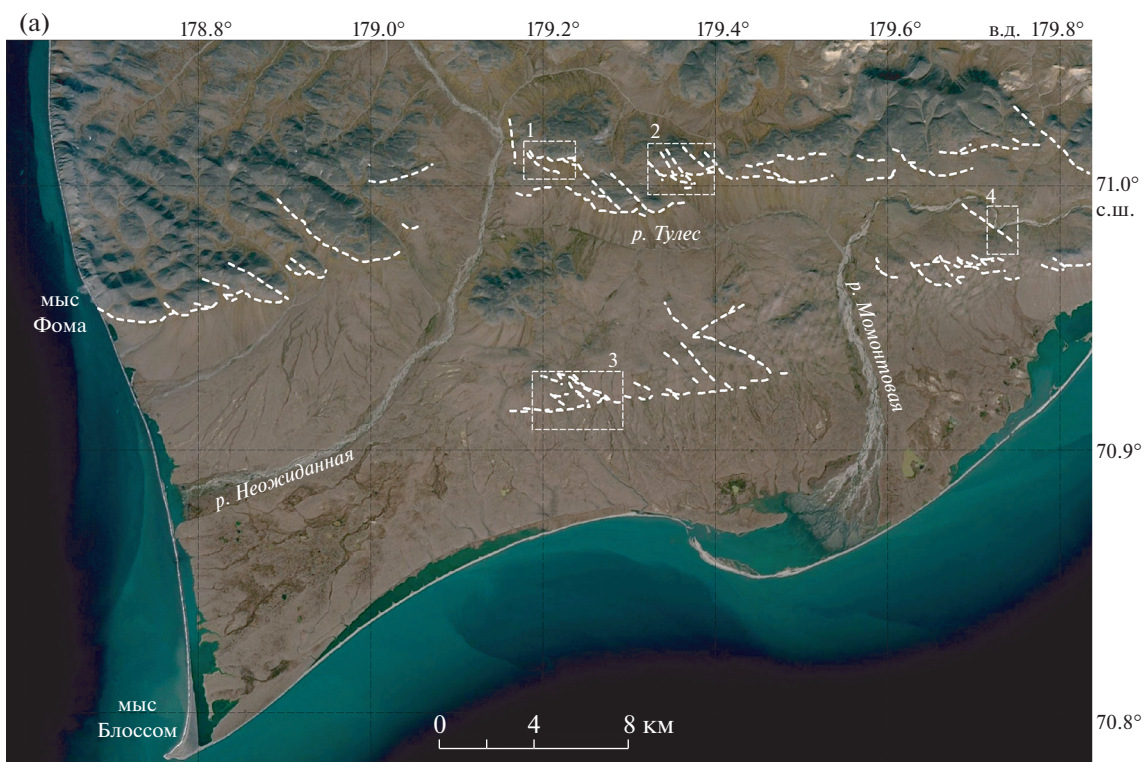
С начала 1960-х гг. в районе острова известно лишь несколько эпицентров слабых землетрясений с магнитудой $M = 2.5–3$ [48]. Тем не менее, с использованием формализованного подхода по комплексу геолого-геофизических критериев, характеризующих степень современной тектонической активности региона, на острове Врангеля была выделена зона возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) с прогнозной магнитудой $M_{\max} = 3.8–4.1$ [2], только на карте общего сейсмического районирования России ОСР-2016-С для

Рис. 8. Схемы разрывов в юго-западной части о. Врангеля по дистанционным данным (в основе – космический снимок, по [51]).

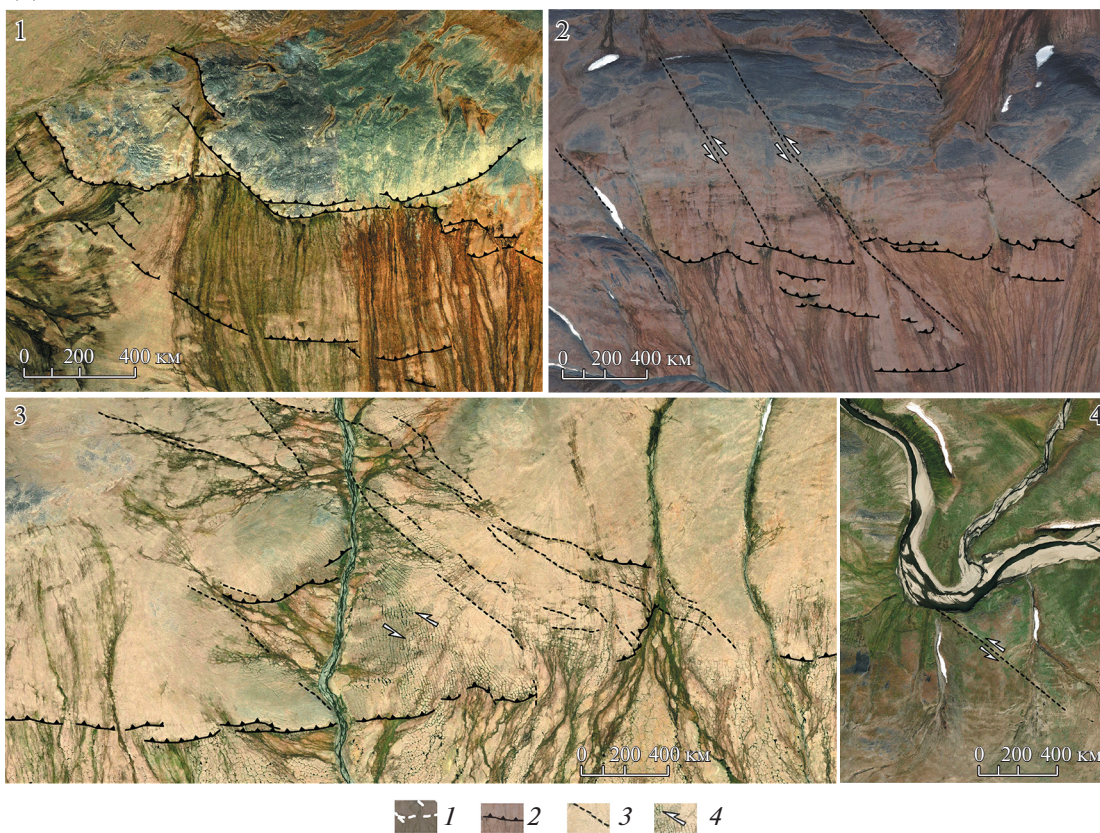
(а) – общая схема; (б) – детальные участки 1, 2, 3, 4.

На (а): обозначены участки 1, 2, 3, 4 (прямоугольники).

1 – генерализованные разрывы на общей схеме; 2 – взбросо-надвиговые уступы (треугольники направлены в сторону падения сместителя); 3 – диагональные сдвиги; 4 – направление сдвига



(б)



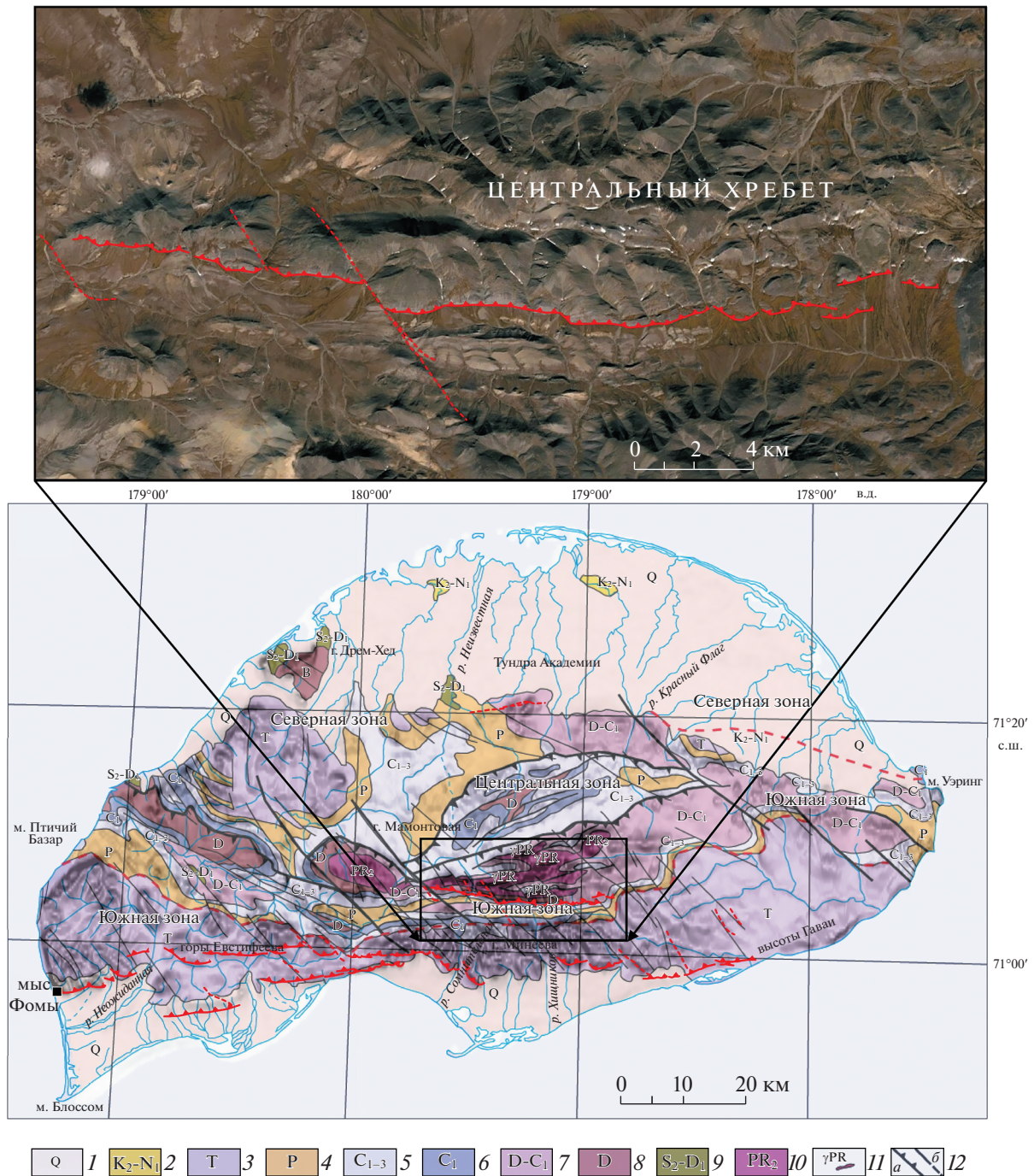


Рис. 9. Генерализованная схема разрывов на о. Врангеля по дистанционным данным. Основа: геологическая карта и тектоническое районирование о. Врангеля (по данным [18, 32], с изменениями и дополнениями).

Показана (прямоугольник на карте) схема взбросо-надвиговых уступов (линии с треугольниками, направленными в сторону падения сместителя) и диагональных сдвигов (штрих-линии красным) на космоснимке в южном подножии Центрального хребта (космоснимок получен с использованием программы Esri ArcGIS Desktop [51]).

1 – четвертичные отложения; 2 – глины, алевроиты, песок с гравием (верхний мел–миоцен); 3 – аргиллиты, песчаники, алевролиты (триас); 4 – глинистые сланцы, известняки, песчаники, реже кремнистые породы и гравелиты (пермь); 5 – известняки, алевролиты, глинистые и филлитовидные сланцы (нижне-верхнекаменноугольный); 6 – конгломераты, сланцы, известняки, доломиты, пласты гипса, кислые и основные эффузивы (нижнекаменноугольный); 7 – песчаники, сланцы, конгломераты, редко карбонатные породы и эффузивы (девонско–нижнекаменноугольные отложения неразделенные); 8 – песчаники, алевролиты, сланцы, кварциты, конгломераты, линзы известняка (девон); 9 – известняки, доломиты, песчаники, алевролиты, глинисто-серицитовые сланцы (верхний силур–нижний девон); 10 – метавулканиды (основного, среднего, реже – кислого составов), метапесчаники, сланцы (верхний протерозой, врангелевский комплекс); 11 – позднепротерозойские гранитоиды; 12 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – прочие разрывные нарушения

периода повторяемости в 5000 лет в южной части острова Врангеля выделена 6-балльная зона [38]. На всех остальных картах общего сейсмического районирования России остров Врангеля позиционируется как асейсмичный – в регионе прогнозируется 5 баллов от транзитных сотрясений в удаленных очагах.

Разрывы молодых отложений по данным георадарного профилирования, приуроченность к зоне крупного надвига с приразломной складчатостью в коренных слоях позднего триаса, общая морфологическая выразительность уступа, расположение здесь местного базиса эрозии, резкая смена условий современного осадконакопления, активизация рельефа (привершинные рвы, уступы и скальные оползни) свидетельствуют о молодом поднятии горной цепи вдоль предгорного уступа Западного плато. Несмотря на низкий уровень современной сейсмической активности, выявленные структуры позволяют полагать, что в недалеком геологическом прошлом здесь происходили сильные землетрясения.

Наблюдаемые в районе мыса Фомы привершинные рвы и уступы в терминах, применяемых В.П. Солоненко [35], рассматриваются как гравитационно-сейсмотектонические нарушения. Они представляют собой переходную форму между сеймогравитационными и сейсмотектоническими нарушениями, которые прямо предопределены тектоническими смещениями, но сильно искажены силой тяжести.

А.А. Никонов [21], такие деформации рассматривает как сейсמודинамические, возникающие не за счет тектонических сил, но в результате инерции горных масс при резких сейсмических колебаниях скальных массивов. Такие образования (сакунги), зафиксированы в эпицентральных зонах многих исторических и современных землетрясений как в связи с сейсморазрывами, так и без связи с ними [46].

Одним из самых грандиозных примеров образования таких структур является очаговая зона Гоби-Алтайского землетрясения 1957 года с магнитудой $M_s = 8.1$, где в скальных породах образовались многочисленные сбросы, ограничивающие грабенообразные проседания вершинной части хребтов, вплоть до срывов горных вершин [9].

Обычные формы рельефа такого типа – привершинные рвы, обратные уступы на склонах хребтов (с поднятыми подгорными крыльями и опущенными вершинами) и закрытые мелкие впадины. Они четко вписаны в рельеф и, как правило, развиты в привершинных частях и на склонах горных хребтов, не глубже местного базиса эрозии.

В эпицентральной зоне сильного землетрясения вершины гор, обладающие максимальной свободой и величиной колебаний, испытывают

инерционные смещения относительно оснований гор (эффект небоскреба). В результате возникают высокие скалывающие напряжения и, как следствие – возникновение привершинных разрывов. Такие события возникновения привершинных разломов возможны и в случае привершинных рвов и уступов на острове Врангеля, где наблюдаются те же основные признаки.

Вероятнее всего, сейсмогенное происхождение имеют также разновозрастные скальные оползни, выдвинувшиеся в приморскую низменность на 30–40 м от предгорного уступа. Для них характерны признаки, рассматриваемые в качестве критериев сейсмогенности [21, 39, 42, 43]:

- формирование в прочных массивах, для которых оползнеобразование нетипично (т.е. в отсутствие других факторов, способных вызвать смещение);
- необычно большой захват склона в глубину (глубже базиса эрозии);
- горизонтальные смещения оползневых тел относительно ниш на аномально большое расстояние;
- наложенный характер поверхностей отрыва;
- продолжение поверхностей отрыва за водоразделы.

Сейсмогенные оползни перемещаются на гораздо большее расстояние, имеют иную динамику, дальность, а часто и направление смещения, чем обычные гравитационные оползни. В качестве современных аналогов можно привести хорошо изученные примеры эпицентральных зон Алтайского (2003 г., $M_s = 7.5$) и Рачинского (1991 г., $M_s = 6.9$) сильных землетрясений [23, 27].

Таким образом, собранные материалы, позволяют обоснованно полагать, что подвижки по разлому реализуют надвигание горного хребта на приморскую низменность и сопровождались сильными землетрясениями, следы которых сохранились в рельефе.

Направление и морфология смещений по изученному взбросо-надвику усложняют конвергентную модель, разработанную для более древних этапов геодинамической эволюции о. Врангеля [5, 18, 19, 31]. Относительно хорошо изученные палеозойско–мезозойские складчато-надвиговые структуры имеют общее южное падение при субширотном простирании [5, 8, 18, 31, 36].

При этом складки, развитые вдоль надвигов, представляют собой опрокинутые на север антиклинали с крутыми северными крыльями и пологими южными крыльями. Палеозойско–мезозойская складчато-надвиговая структура острова представляет собой целый набор надвиговых пластин-чешуй, в каждой из которых наблюдается опрокинутая к северу антиклинальная складка с разорванным по надвику северным крылом.

Протяженность таких пакетов прослежена на 10–40 км, амплитуда смещения по надвигам составляет до 3 км [18].

Этот структурный план был сформирован в обстановке субмеридионального сжатия в мезозое (раннем мелу) с общим смещением масс с юга на север. На субширотный главный структурный план острова наложены более молодые правосторонние сдвиги северо-западного простирания, смещающие поверхности надвигов на первые сотни метров [5].

Система субширотных надвигов Врангелевской области является наиболее древним мезозойским парагенезом региона, поскольку на шельфе они срезаются как субмеридиональными сдвигами Пегтымельской разломной зоны, так и диагональными надвигами Чаун-Чукотской складчатой зоны [25].

Изученный нами активный взбросо-надвиг имеет северное падение и отражает смещение горной цепи с севера на юг. Это может свидетельствовать о формировании разлома в современном поле тектонических напряжений, отличным от мезозойского. Морфоструктура горной цепи острова Врангеля имеет асимметричный облик — с крутым и коротким южным крылом, где происходит взбрасывание или надвигание гор на южную приморскую низменность и пологим северным, гораздо более плавно переходящим в широкую северную приморскую равнину.

Морфоструктурная асимметрия острова находит отражение и в современном осадконакоплении — в южной части острова в приустьевых участках наиболее крупных рек на выходе из гор отмечено широкое развитие наземных дельт [17]. В отличие от наземных дельт южного побережья, дельты северного берега были относительно недавно затоплены и в настоящее время медленно осушаются.

ВЫВОДЫ

1. Изученный нами на мысе Фомы уступ имеет тектоническую природу и представляет собой активный разлом, по которому в современную геологическую эпоху происходили неоднократные подвижки. Уступ связан с зоной крупного надвига, вдоль уступа наблюдаются поднятия долин ручьев и сейсмогенные нарушения скального массива. Подвижки реализуют надвигание горного хребта на приморскую низменность в южном направлении.

2. Приведенные в нашем исследовании признаки позволяют выдвинуть предположение о том, что подвижки имели сейсмотектонический характер, т.е. представляли собой акты сейсмической активизации.

3. Низкая сейсмическая активность острова Врангеля на инструментальном этапе наблюдений позволяет предположить, что в настоящее время он находится в стадии сейсмического затишья.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность С.А. Чечулину, директору экспедиционного департамента Русского географического общества (г. Москва, Россия) за организацию экспедиции по Северному морскому пути на ледоколе “Илья Муромец”; полковнику ВМФ РФ С.Б. Чуркину, научному руководителю экспедиции от Северного флота РФ; В.А. Осипову, капитану ледокола “Илья Муромец” за безопасный проход в водах Северного Ледовитого океана и всей корабельной команде, выполнившей свою работу на самом высоком уровне.

Авторы благодарят анонимных рецензентов, рецензента проф. В.Г. Трифонова (ГИН РАН, г. Москва, Россия) и рецензента чл.-корр. РАН, проф. С.Д. Соколова (ГИН РАН, г. Москва, Россия) и к.г.-м.н. Л.П. Имаеву (ИЗК СО РАН, г. Иркутск, Россия) за конструктивные комментарии, авторы благодарят редактора М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

Финансирование. Научная программа выполнена в рамках работ по Государственному заданию ИФЗ РАН, георадарные исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-12-00083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аветисов Г.П.* Сейсмоактивные зоны Арктики. — СПб.: ВНИИОкеанологии, 1996. 185 с.
2. *Аветисов Г.П., Зинченко А.Г., Мусатов Е.Е., Пискарев А.Л.* Сейсмическое районирование Арктического региона. — в кн.: *Российская Арктика: геологическая история, минералогия, геоэкология.* — Под ред. Д.А. Додина, В.С. Суркова — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. С.162–175.
3. *Авдюничев В.В.* Морфоструктуры и обстановки кайнозойского осадконакопления о. Врангеля. — В кн.: *Геология, литодинамика и россытеобразование в прибрежных зонах Арктики.* — Под ред. О.В. Суздальского, В.К. Дорофеева — Л.: Севморгеология, 1990. С. 76–84.
4. *Бондаренко С.А., Виноградов В.А., Горячев Ю.В., Гусев Е.А., Зайончек А.В., Кийко О.А., Лопатин Б.Г., Опекунов А.Ю., Ромащенко О.Г., Супруненко О.И., Сухов К.С., Усов А.Н., Черных А.А.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. — М-6 1 : 1 000 000 (третье поколение). — Серия Чукотская. — Лист R-1, 2. — остров Врангеля. — Объяснительная записка. — Под ред. Е.А. Гусева — СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 144 с.
5. *Вержбицкий В.Е., Соколов С.Д., Тучкова М.И.* Современная структура и этапы тектонической эволюции острова Врангеля (Российская Восточная

- Арктика) // Геотектоника. 2015. № 3. С. 3–35.
<https://doi.org/10.7868/S0016853X15030066>
6. Владов М.Л., Судакова М.С. Современные направления георадиолокации // Вестн. МГУ. Сер. 4: Геол. 2018. № 2. С. 3–12.
<https://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-2-3-12>
 7. Воронин А.Я. Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара “ЛОЗА-В” // Бюлл. ПИ РАН. 2015. № 80. С. 106–128.
 8. Громов Л.В. Остров Врангеля, его геологическое строение и полезные ископаемые. – Л.: ААНИИ, 1939. 348 с.
 9. Гоби-Алтайское землетрясение. – Под ред. Н.А. Флоренсова, В.П. Солоненко – М.: АН СССР, 1963. 391 с.
 10. Зыков Д.С. Геоморфологические признаки проявления горизонтальной компоненты неотектонических движений вдоль границы Балтийского щита и Западно-Арктической платформы (Мурманская область) // Геоморфология. 2015. № 3. С. 27–38.
 11. Едемский Д.Е., Попов А.В., Прокопович И.В., Дегтерев А.В., Рыбин А.В. Опыт георадиолокационного зондирования почвенно-пирокластического чехла юго-восточной части о. Матуа (Курильские острова) // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2018. Т. 40. № 4. С. 69–81.
<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-4-40-69-81>
 12. Едемский Д.Е., Попов А.В., Прокопович И.В., Садыков Т.Р., Блохин Е.К., Каспари Д. Применение геофизических методов при обследовании периферии кургана Туннуг-1. // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 11. С. 40–48.
<https://doi.org/10.17513/mjpf.12929>
 13. Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Овсяченко А.Н. Георадиолокационное зондирование отложений в пределах деградирующего полигонального микро-рельефа в Арктике // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 5 С. 55–69.
<https://doi.org/10.15372/KZ20210506>
 14. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. – Под ред. Г.С. Гусева – М.: ГЕОС, 2000. 227 с.
 15. Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Овсяченко А.Н., Колодезников И.И. Неотектоника Хараулахского сектора прибрежно-шельфовой зоны моря Лаптевых // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 7. С. 1014–1031.
<https://doi.org/10.15372/GiG20180707>
 16. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Мельникова В.И., Середкина А.И., Маккей К.Д., Ашурков С.В., Смекалин О.П., Овсяченко А.Н., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики. – Под ред. Л.П. Имаевой, И.И. Колодезникова – Новосибирск: СО РАН, 2017. 136 с.
 17. Кирюшина М.Т. Основные черты четвертичной истории острова Врангеля. – В кн.: *Антропогенный период в Арктике и Субарктике*. – М.: Недра, 1965. С. 89–105 (Тр. НИИГА. 1965. Том 143).
 18. Косыко М.К., Авдюничев В.В., Ганелин В.Г., Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Сесил М.П., Смирнов А.Н., Ушаков В.И., Хандожко Н.В., Харрисон Дж.К., Шульга Ю.Д. Остров Врангеля: геологическое строение, минерагения, геоэкология. – Под ред. М.И. Косыко, В.И. Ушакова – СПб.: ВНИИОкеанология, 2003. 137 с.
 19. Моисеев А.В., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А. Этапы структурной эволюции осадочного чехла о. Врангеля, Восточная Арктика // Геотектоника. 2018. № 5. С. 22–38.
<https://doi.org/10.1134/S0016853X18050041>
 20. Николаева С.Б. Свидетельства сейсмических событий на побережье Мурмана в позднеледниковье и голоцене // Изв. РГО. 2013. Т. 145. Вып. 4. С. 53–65.
 21. Никонов А.А. Терминология и классификация сейсмогенных нарушений рельефа // Геоморфология. 1995. № 1. С. 4–10.
 22. Никонов А.А., Зыков Д.С. О признаках мощных землетрясений в восточном секторе Мурманской зоны (Линия Карпинского) // Тр. Фермановской научн. сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. Вып. 14. С. 143–148.
 23. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ларьков А.С., Новиков С.С. Позднечетвертичные дислокации и сейсмотектоника очага Рачинского землетрясения (Большой Кавказ) // Геотектоника. 2014. № 6. С. 55–76.
<https://doi.org/10.7868/S0016853X14050051>
 24. Овсяченко А.Н., Собисевич А.Л., Ляменков М.В., Жостков Р.А. Новые данные о сильных землетрясениях в Арктической зоне Российской Федерации по результатам геолого-геофизических исследований на острове Белуха // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 1. С. 60–64.
<https://doi.org/10.31857/S2686739721070070>
 25. Рекант П.В., Петров О.В., Прищепенко Д.В. Формирование складчато-надвиговой структуры южной части шельфа Восточно-Сибирского моря по результатам структурного анализа сейсмических материалов // Регион. геология и металлогения. 2020. № 82. С. 35–59.
 26. Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмотектоники. – Под ред. А.О. Глико. – М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.
 27. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. // Геотектоника. 2007. № 2. С. 3–23.
 28. Рогожин Е.А., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Конечная Я.В. Новая карта сейсмичности Европейского сектора Российской Арктики // Геотектоника. 2016. № 3. С. 19–25.
<https://doi.org/10.7868/S0016853X16030103>
 29. Романенко Ф.А., Баранская А.В., Луговой Н.Н., Аляутдинов А.Р. Геологические и геоморфологические наблюдения на Северной Земле (некоторые предварительные результаты экспедиции “Открытый океан: архипелаги Арктики-2019”). – В кн.: *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. – СПб.: ААНИИ, 2020. Вып. 7. С. 168–174.
<https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10726>

30. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. — М.: МГУ, 1993. 336 с.
31. Соколов С.Д., Тучкова М.И., Моисеев А.В., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Гуцина М.Ю. Тектоническая зональность острова Врангеля (Арктика) // Геотектоника. 2017. № 1. С. 3–18. <https://doi.org/10.7868/S0016853X17010088>
32. Соколов С.Д., Тучкова М.И. Остров Врангеля. — В кн.: *Тектоностратиграфический атлас Арктики*. — Под ред. О.В. Петрова, М. Смеллора — СПб.: ВСЕГЕИ, 2020. С. 113–116.
33. Суходровский В.Л., Гравис Г.Ф. Мерзлота и рельеф. — В кн.: *История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока*. — Кн. I — Проблемы экзогенного рельефообразования. — Под ред. Д.А. Тимофеева — М.: Наука, 1976. С. 189–263.
34. Солоненко В.П. Определение эпицентральных зон землетрясений по геологическим признакам // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1962. № 11. С. 58–74.
35. Солоненко В.П. Палеосейсмогеология // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1973. № 9. С. 3–16.
36. Тильман С.М., Богданов Н.А., Бялобженский С.Г., Чехов А.Д. Остров Врангеля. — В кн.: *Геология СССР. — Т. XXVI. — Острова Советской Арктики. Геологическое описание*. — Под ред. Б.В. Ткаченко, Б.Х. Егизарова — М.: Недра, 1970. С. 377–404.
37. Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. 2010. № 6. С. 79–98.
38. Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С., Акатова К.Н., Антикаев Ф.Ф., Данилова Т.И., Кожурин А.И., Медведева Н.С., Никонов А.А., Перетокин С.А., Пустовитенко Б.Г., Стром А.Л. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
39. Федоренко В.С. Горные оползни и обвалы, их прогноз. — М.: МГУ, 1988. 214 с.
40. Флоренсов Н.А. О неотектонике и сейсмичности Монголо-Байкальской горной области // Геология и геофизика. 1960. № 1. С. 74–90.
41. Burbank D.W., Anderson R.S. Tectonic geomorphology. — Chichester: Wiley&Blackwell, 2012. 2nd edn., pp. 454.
42. Jibson R.W. Using landslides for paleoseismic analysis. — In *Using Ground-Failure Features for Paleoseismic Analysis*. — Ed. by S.F. Obermeier, R.W. Jibson, (USGS Open-File Rep. 94-663. 1995), P. 105–156.
43. Keefer D.K. Landslides caused by earthquakes // GSA Bull. 1984. No. 95. P. 406–421.
44. Kopeikin V.V., Edemsky D.E., Garbatsevich V.A., Popov A.V., Reznikov A.E., Schekotov A.Yu. Enhanced Power Ground Penetrating Radars, (Proc. 6th Int. Conf. “Ground Penetrating Radar”, Sendai, Japan, 1996), P. 152–154.
45. Kopeikin V.V., Morozov P.A., Edemskiy F.D., Edemskiy D.E., Pavlovskii B.R., Sungurov Yu.A. Experience of GPR application in oil-and-gas industry, (Proc. 14th Int. Conf. “Ground Penetrating Radar”, Shanghai, China. 2012. Vol. 3), P. 817–819.
46. McCalpin J.P. Criteria for determining the seismic significance of sackungen and other scarplike landforms in mountainous regions. — In: *Techniques for Identifying Faults and Determining Their Origins*, (NUREG/CR-5503, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DCNUREG/CR-5503, 1999), P. 122–142.
47. McCalpin J.P. Paleoseismology. — (NY: Elsevier, 2009. 2nd edn.), pp. 613.
48. Mackey K.G., Fujita K., Hartse H.E., Stead R.J., Steck L.K., Gunbina L.V., Leyshuk N., Shibaev S.V., Koz'min B.M., Imaev V.S., Gordeev E.I., Chebrov V.N., Masal'ski O.K., Gileva N.A., Bormatov V.A., Voitenok A.A., Levin Y.N., Fokina T.A. Seismicity map of eastern Russia, 1960–2010 // Seismol. Res. Lett. 2010. Vol. 81. No. 5. P. 761–768. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.5.761>
49. ООО “Компания ВНИИСМИ” [Электронный ресурс]. URL: www.geo-radar.ru/ (дата обращения: 05.03.2021).
50. Agisoft Metashape, <https://www.agisoft.com/> (дата обращения: 28.07.2021)
51. Esri ArcGIS Desktop, <https://www.esri.com/en-us/home/> (дата обращения: 02.07.2021)
52. GEBCO Compilation Group, 2021. GEBCO 2021 Grid. <https://www.gebco.net> <https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f>

Active Tectonics of the Eastern Arctic: New Data from Geological and Geophysical Studies at Cape Thomas (West of Wrangel Island)

A. N. Ovsyuchenko^a, D. E. Edemsky^b, R. A. Zhostkov^{a,*}

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
bld.10, st. Bol'shaya Gruzinskaya, 123995 Moscow, Russia

^bPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences
(IZMIRAN), bld.4, Kaluzhskoe sh., 108840 Moscow, Troitsk, Russia

*e-mail: shageraxcom@yandex.ru

The results of the first comprehensive geological and geophysical studies of active tectonics in the western part of Wrangel Island, carried out during the expedition of the Northern Fleet and the Russian Geograph-

ical Society in 2020, are presented. Our research was conducted at Cape Thomas. An active fault at Cape Thomas was identified as an active sublatitudinal fault, along which there had been the repeated movements, realizing the thrust of the mountain ridge onto the coastal lowland in the south direction. In contrast to the Paleozoic–Mesozoic south-dipping structures, the active reverse-thrust has a north-dip and reflects the shift of the mountain range from north to south. The studies carried out allow us to reasonably believe that a potential source of strong earthquakes extends along the boundary of the growing tectonic block of the Western Plateau and the southern coastal lowland of Wrangel Island. The data obtained significantly refine the dynamics and kinematics of young tectonic movements on Wrangel Island, but are in conflict with low seismic activity. It has been suggested that the potential source is currently in the stage of seismic quiescence.

Keywords: active tectonics, paleoseismology, seismotectonics, georadar, seismic hazard, earthquake source, Arctic, Wrangel Island

УДК 553.24:550.83(571.5)

СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРО-ВОСТОКА АЛДАНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ И АЛМАЗОНОСНОСТЬ

© 2022 г. Г. А. Стогний¹, В. В. Стогний^{1, 2, *}¹Кубанский государственный университет, д. 149, ул. Ставропольская, 350040 Краснодар, Россия²Геофизический институт ВНИИ РАН, д. 93а, ул. Маркова, 362002 Владикавказ, Россия

*e-mail: stogny_vv@mail.ru

Поступила в редакцию 18.12.2021 г.

После доработки 14.03.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Проведен анализ гравитационного и магнитного поля восточной части Алданской антеклизы на площади, ограниченной 126° и 138° восточной долготы и 58° и 64° северной широты, и сейсмических материалов по опорному профилю 3-ДВ “Томмот–Хандыга” с целью выявления особенностей строения раннедокембрийской консолидированной коры и оценки потенциальной алмазонасности территории. Показано, что кристаллический фундамент Учурским коромантийным разломом разделен на палеопротерозойский Алданский гранулит-гнейсовый пояс и архейскую Батомгскую гранит-зеленокаменную область, южные сегменты которых изучены в пределах Алдано-Станового щита. Процессы формирования в палеопротерозое Алданского гранулит-гнейсового пояса способствовали увеличению мощности земной коры до 50–52 км по сравнению с архейской Батомгской гранит-зеленокаменной областью (42–45 км). К Бестяхскому блоку Батомгской гранит-зеленокаменной области приурочено Хомпу-Майское кимберлитовое поле с трубкой Туймада. К основным региональным критериям потенциальной алмазонасности выделяемой субпровинции северо-востока Алданской антеклизы отнесено: наличие литосферного корня мощностью до 220 км, гранит-зеленокаменный тип раннедокембрийской коры, а также низкие значения теплового потока.

Ключевые слова: Алданская антеклиза, гранулит-гнейсовый пояс, гранит-зеленокаменная область, кристаллический фундамент, гравитационное поле, магнитное поле, сейсмический разрез, алмазонасность

DOI: 10.31857/S0016853X22030080

ВВЕДЕНИЕ

Одной из геологических проблем северо-востока Алданской антеклизы, активно обсуждаемых после открытия в 2007 г. в 100 км юго-восточнее г. Якутска (Республика Саха (Якутия)) первой кимберлитовой трубки Манчары, является оценка ее потенциальной алмазонасности [16, 21]. К основным в проблеме оценки алмазонасности региона исследования относятся задачи выявления особенностей структуры и глубинного строения земной коры. Новые данные изучения глубинного строения земной коры северо-восточной части Алданской антеклизы получены по результатам интерпретации материалов опорного профиля 3-ДВ “Томмот–Хандыга” [4, 22, 32]. В нашем исследовании рассматривается Якутский отрезок (700–1650 км) опорного профиля 3-ДВ, который в интервале 700–1630 км пересекает северо-восточную часть Алданской антеклизы, а в интервале 1630–1650 км – Верхоянский складчато-надвиговый пояс (рис. 1).

Платформенный чехол Алданской антеклизы, выделяемой по рельефу кристаллического фундамента, сложен рифей–мезозойскими отложениями мощностью от первых десятков метров до 7 км [18, 35]. Раннедокембрийские метаморфические породы кристаллического фундамента северо-восточной части Алданской антеклизы вскрыты на глубине 500 и 664 м в районе г. Якутска и на глубине 3506 м Ивановской скважиной, расположенной в 40 км севернее линии профиля 3-ДВ в бассейне р. Алдан.

Имеющиеся схемы тектонического районирования кристаллического фундамента северо-восточной части Алданской антеклизы отражают различные подходы к изучению раннедокембрийской земной коры: блоковой делимости, террейнового анализа, в системе гранит-зеленокаменных и гранулит-гнейсовых областей [8, 16, 20, 25, 27]. Схемы, представленные в работах О.М. Розена [20] и А.П. Смелова с соавт. [25], рассматриваются нами в качестве базовых схем.

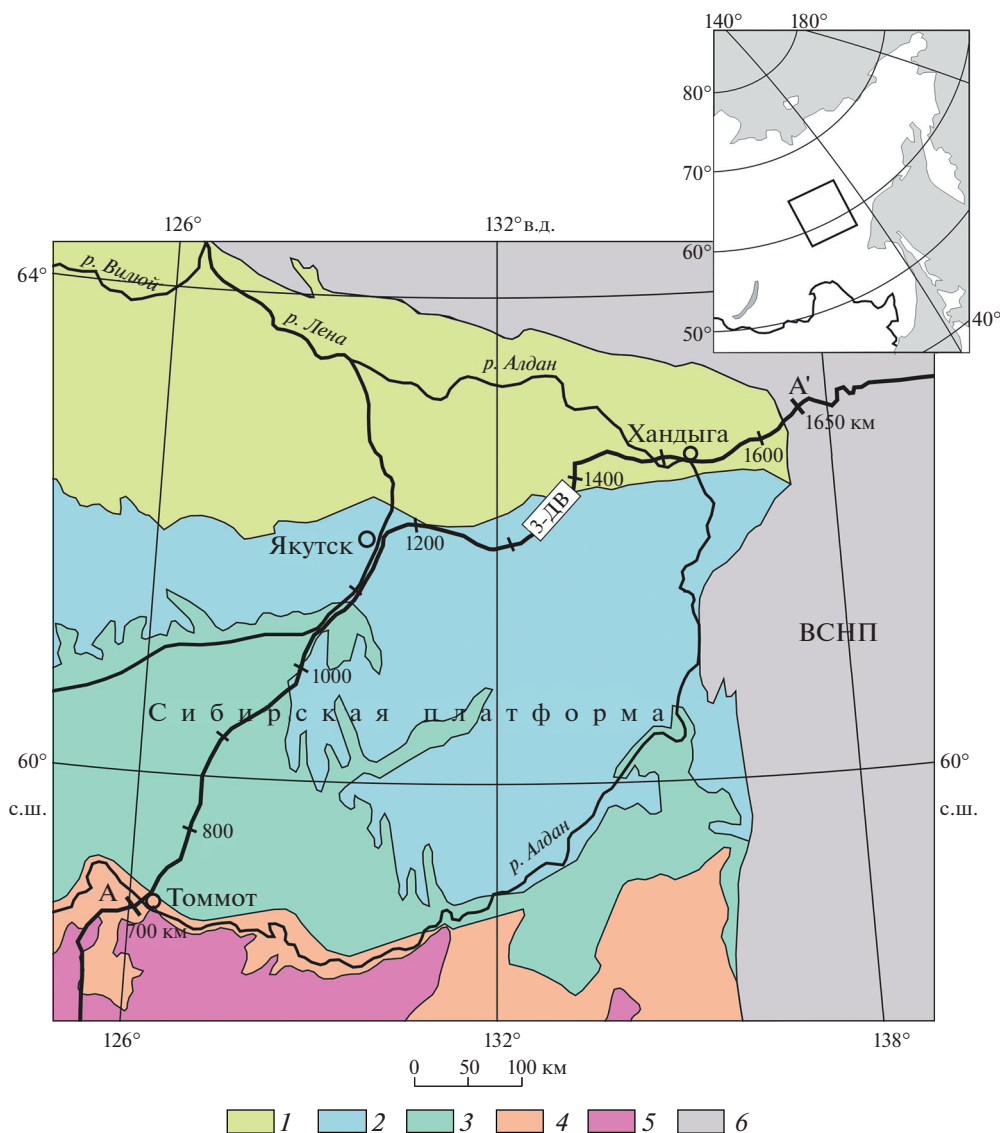


Рис. 1. Схема геологического строения восточной части Алданской антеклизы (по данным [3], с изменениями и дополнениями).

На врезке: обозначен (прямоугольник) регион исследования.

Обозначено: ВСНП – Верхоянский складчато-надвиговый пояс.

A–A' – линия Якутского отрезка опорного профиля 3–ДВ.

1–4 – осадочные отложения платформенного чехла Сибирской платформы: 1 – мел, 2 – юра, 3 – кембрий, 4 – рифей–венд; 5 – раннекембрийские метаморфические породы Алдано-Станового щита; 6 – мезозой–неопротерозойские отложения Верхоянского складчато-надвигового пояса

Линия Якутского отрезка профиля 3–ДВ пересекает Далдыно-Алданский и Хапчано-Учурский гранулитовые пояса и Тырынский гнейсовый террейн [25] (рис. 2). Разделяющая Далдыно-Алданский и Хапчано-Учурский гранулитовые пояса зигзагообразная Тыркандинская зона тектонического меланжа юго-восточной части Сибирской платформы выделена в контурах линейных максимумов аномального магнитного поля.

Кристаллический фундамент Алданской антеклизы по линии профиля 3–ДВ (по [20]) пред-

ставлен Алданским и Учурским гранулитовыми террейнами и гранит-зеленокаменным Батомгским террейном, которые продолжают с одноименных тектонических структур Алдано-Станового щита (рис. 3).

Алмазосодержащие кимберлиты приурочены, в основном, к архейским гранит-зеленокаменным областям, поэтому одним из ключевых вопросов при оценке потенциальной алмазности северо-востока Алданской антеклизы является уточнение границ Батомгской гранит-

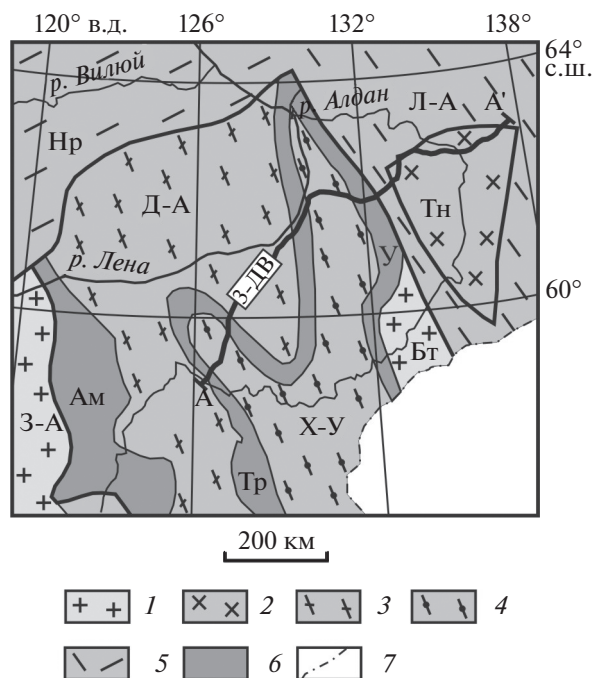


Рис. 2. Структура кристаллического фундамента Алданской антеклизы (по данным [25], с изменениями и дополнениями).

Террейны: З-А – Западно-Алданский; Бт – Батомгский; Тн – Тыринский.

Гранулитовые пояса: Д-А – Далдыно-Алданский; Х-У – Хапчано-Учурский; Нр – Нюрбинский; Л-А – Лено-Алданский.

Зоны тектонического меланжа: Ам – Амгинская; Тр – Тыркандинская; У – Улканская. А-А' – линия Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ.

1–2 – террейны: 1 – гранит-зеленокаменные, 2 – тоналит-трондjemито-гнейсовые; 3–5 – пояса: 3 – гранулит-ортогнейсовые, 4 – гранулит-парагнейсовые, 5 – позднепротерозойские орогенные; 6 – зоны тектонического меланжа; 7 – граница Республики Саха (Якутия)

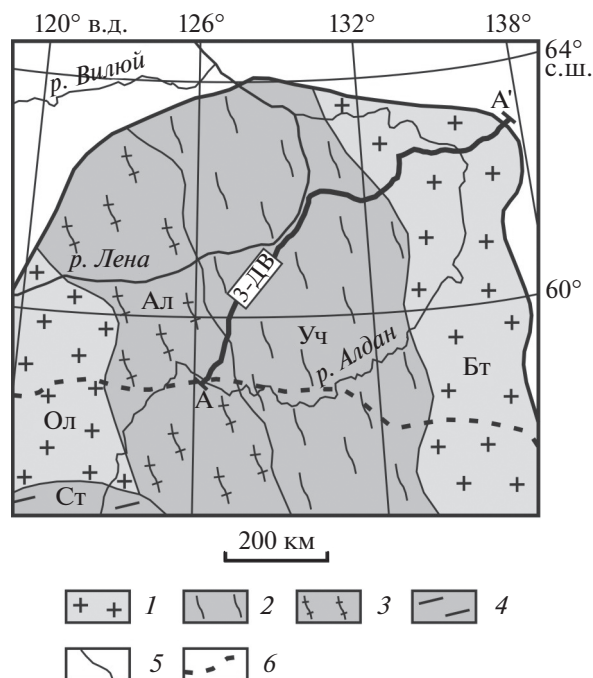


Рис. 3. Структура кристаллического фундамента Алданской антеклизы (по данным [20], с изменениями и дополнениями).

Террейны: Ол – Олекминский; Ал – Алданский; Уч – Учурский; Бт – Батомгский; Ст – Сутамский. А-А' – линия Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ.

1 – гранит-зеленокаменные комплексы (3.5–3.0 млрд лет); 2 – эндрбиты и мафитовые гранулиты (3.5–2.7 млрд лет); 3 – комплекс эндрбитов и метаседиментов (3.5–3.3 млрд лет); 4 – эндрбиты и мафитовые гранулиты, интенсивно деформированные (2.2–1.8 млрд лет); 5 – границы террейнов; 6 – северная граница выходов метаморфических пород Алдано-Станового щита

зеленокаменной области под платформенным чехлом и выявление ее структурных особенностей как региональных критериев алмазности.

В основу нашего исследования заложен анализ гравитационного и магнитного полей в комплексе с полученными сейсмическими данными по опорному профилю 3-ДВ для обоснования алмазности северо-востока Алданской антеклизы.

АНАЛИЗ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Интерпретация геолого-геофизических материалов северо-восточной части Алданской антеклизы проведена на площади, ограниченной 126° и 138° восточной долготы и 58° и 64° северной широты.

Исходные материалы включали мелкомасштабные карты гравитационного и магнитного полей, а также данные, полученные нами по тематическим работам и геолого-геофизической интерпретации результатов гравиметрических съемок масштаба 1 : 200 000 и аэромагнитных съемок масштаба 1 : 25 000–1 : 50 000 Алданской антеклизы [27, 28]. Использованы данные выполненной спектрально-статистической обработки цифровых моделей гравитационного поля территории Якутии с разделением на высокочастотную, среднечастотную и низкочастотную составляющие [29]. Сейсмические материалы по Якутскому отрезку опорного профиля 3-ДВ в сопоставлении с результатами анализа гравитационного и магнитного полей позволяют сформировать геолого-геофизическую модель глубинного строения северо-востока Алданской антеклизы.

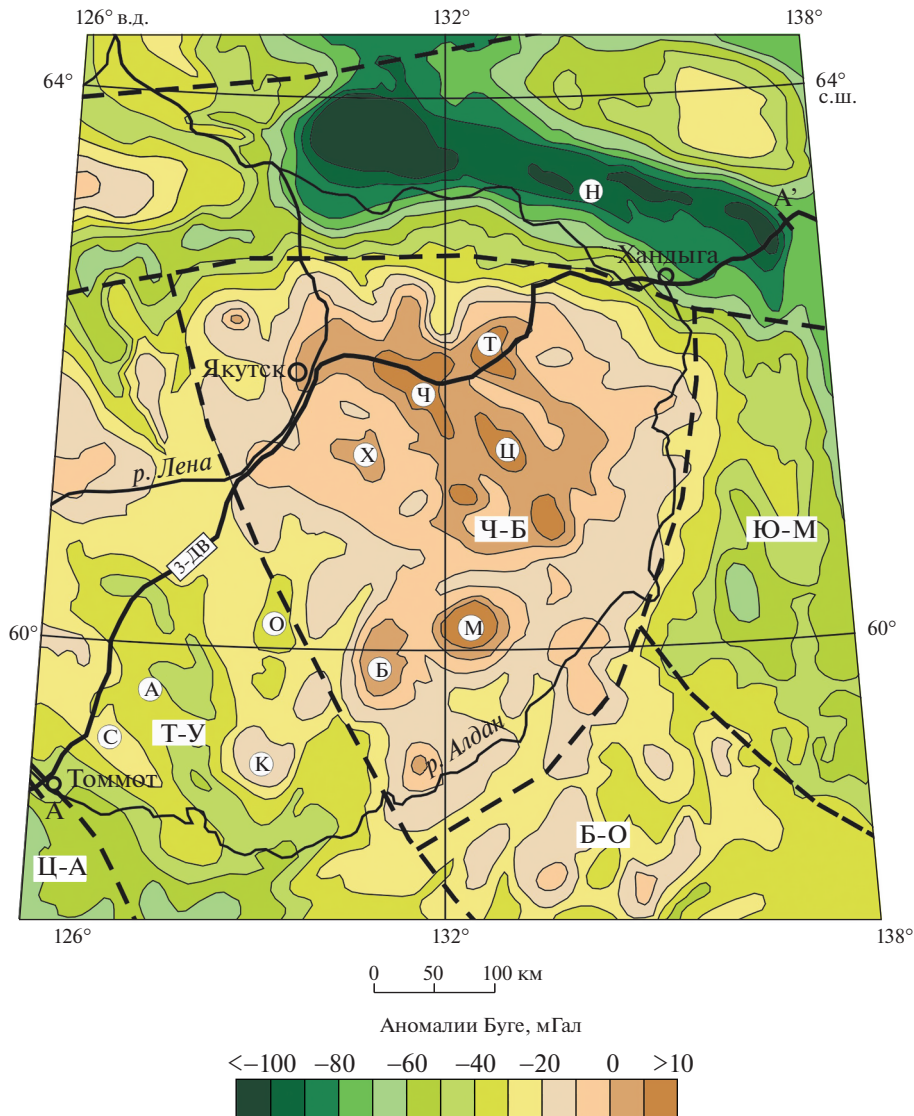


Рис. 4. Схема районирования гравитационного поля северо-восточной части Алданской антеклизы (по данным [6], с изменениями и дополнениями).

Аномальные гравитационные области: Ц–А – Центрально-Алданская; Т–У – Тимптоно-Учурская; Ч–Б – Чурапча-Билирская; Б–О – Батомга-Омнинская; Ю–М – Юдома-Майская.

Гравитационные максимумы: С – Сумнагинский; М – Мильский; Б – Белькачинский; К – Кумахынский; Ц – Центральный; Т – Татинский; Х – Хомпуйский; Ч – Чурапчинский.

Гравитационные минимумы: А – Амбардахский; О – Оннюэнский; Н – Нижнеалданский. А–А' – Якутский отрезок опорного профиля 3-ДВ.

Показаны (линии пунктиром) границы аномальных гравитационных областей.

Гравитационного поле

Районирование гравитационного поля северо-восточной части Алданской антеклизы рассмотрено на иерархических уровнях аномальной области, региональных и локальных максимумов и минимумов. Аномальные области – это крупные (до 1000 км в поперечнике) участки гравитационного поля, различающиеся структурой и видом аномалий (форма, размеры и другие признаки).

На основе принятого определения районирования гравитационного поля выделены следующие аномальные области (рис. 4):

- Центрально-Алданская;
- Тимптоно-Учурская;
- Чурапча-Билирская;
- Батомга-Омнинская;
- Юдома-Майская.

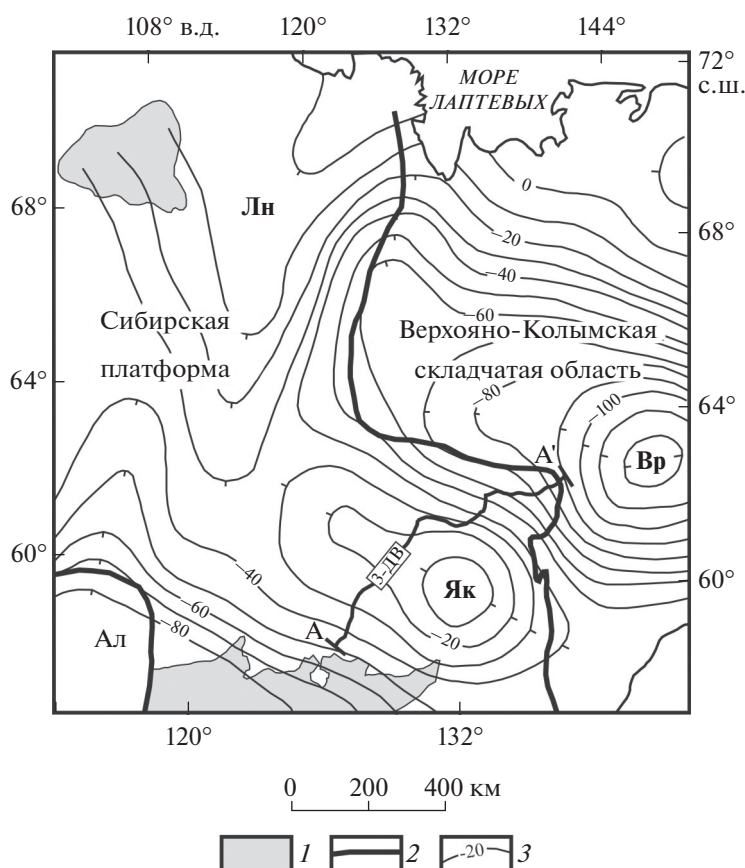


Рис. 5. Схема низкочастотной составляющей гравитационного поля восточной части Сибирской платформы (по данным [29]).

Гравитационные максимумы: Лн – Ленский; Як – Якутский.

Гравитационные минимумы: Ал – Алданский; Вр – Верхоянский.

А–А' – Якутский отрезок опорного профиля 3-ДВ.

1 – выходы раннекембрийских метаморфических пород Сибирской платформы; 2 – граница Сибирской платформы; 3 – изоаномалы гравитационного поля

Линия Якутского отрезка профиля 3-ДВ пересекает Тимптоно-Учурскую и Чурапча-Билирскую аномальные области. Чурапча-Билирская аномальная область высоких значений поля силы тяжести включает Таттинский, Хомпуйский, Чурапчинский, Центральный, Мильский и Белькачинский региональные максимумы. В контурах Таттинского и Чурапчинского максимумов выделены выступы Якутского кристаллического поднятия [35]. Белькачинский и Мильский максимумы отождествляются с высокоплотными блоками кристаллического фундамента либо с базит-гипербазитовыми массивами, верхняя кромка которых расположена соответственно на глубине 300 и 1000 м [16].

Тимптоно-Учурская аномальная область поля силы тяжести в полосе профиля 3-ДВ представлена региональными Сумнагинским максимумом и Амбардахским минимумом северо-западного простирания, отождествляемых с блоками кристаллического фундамента северо-восточного склона Алдано-Станового щита.

Центральной части северо-востока Алданской антеклизы в низкочастотной составляющей гравитационного поля соответствует Якутский максимум амплитудой >40 мГал, который отождествляется с литосферным корнем мощностью до 220 км [29] (рис. 5).

Магнитное поле

В региональном плане аномальное магнитное поле восточной части Алданской антеклизы определяет система линейных максимумов (Тыркандинский, Унгуэлинский, Борогонский, Устьмайский, Чурапчинский и Якутский) протяженностью 200–500 км при ширине более 20 км, имеющих преимущественное северо-западное простирание (рис. 6). В северо-восточной части региона исследований расположены Хандыгский и Эльдиканский магнитные максимумы.

Наиболее детально изучен Тыркандинский линейный максимум в пределах одноименного Тыркандинского разлома Алдано-Станового

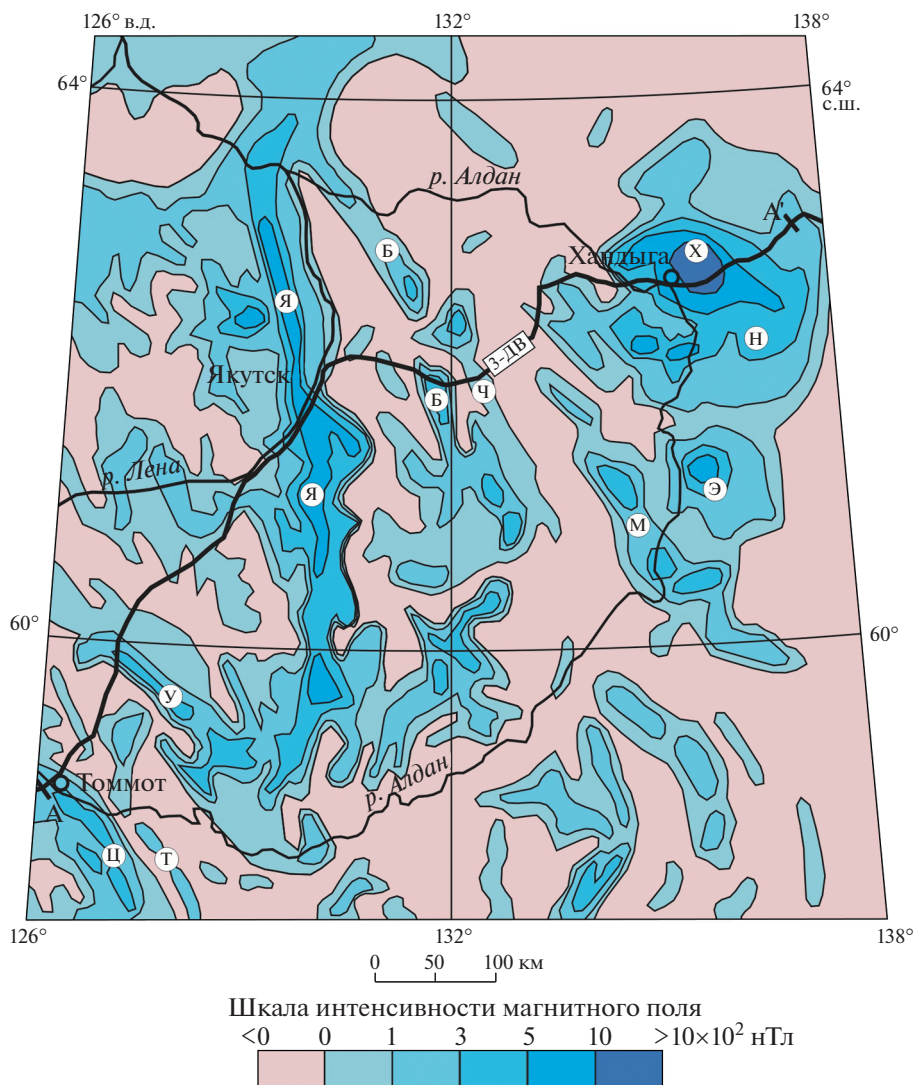


Рис. 6. Схема районирования аномального магнитного поля северо-восточной части Алданской антеклизы (по данным [11], с изменениями и дополнениями).

Региональные линейные максимумы: Б – Борогонский; У – Унгюэлинский; М – Устьмайский; Т – Тыркандинский; Ч – Чурапчинский; Я – Якутский.

Изометричные максимумы: Х – Хандыгский; Э – Эльдиканский; Ц – Центральноалданский; Н – Нижнехандыгский. А–А' – Якутский отрезок опорного профиля 3-ДВ.

щита. По результатам наземных магниторазведочных работ локальные магнитные максимумы Тыркандинского разлома связаны с диафорированными магнетитсодержащими гиперстеновыми и амфибол-гиперстеновыми гнейсами и кристаллическими сланцами, а также магнетитсодержащими гранитами.

На природу Якутского магнитного максимума имеется несколько точек зрения. В.М. Мишнин с соавт. [16] объясняют Якутский магнитный максимум наличием в земной коре Алданской антеклизы мафитового абиссолита типа Великой дайки Родезии, а Г.С. Гусевым с соавт. в работе [8] был выделен Тектюрский протерозойский зеленокаменный трог.

Дискуссионной остается интерпретация Хандыгского регионального магнитного максимума диаметром более 180 км, который отождествляется с кольцевой тектономагматической макроструктурой, сформированной до среднего палеозоя, либо с “горячей точкой”, под действием которой произошло заложение трехлучевой рифтовой системы вдоль восточного края Сибирской платформы [23, 26].

Сейсмические материалы

Глубинное строение северо-востока Алданской антеклизы характеризуют сейсмические материалы геофизического профиля “Березово–Усть-Мая” и опорного профиля 3-ДВ. Линия профиля “Березово–Усть-Мая” в юго-восточном

направлении пересекает Вилюйскую синеклизу и Якутское кристаллическое поднятие Алданской антеклизы. По профилю “Березово–Усть-Мая”, отработанному по методике многоволнового ГСЗ с применением высокоинтенсивных источников сейсмических волн, мощность земной коры Якутского кристаллического поднятия оценивается в 40–45 км [9].

А.С. Егоров [10] представил геолого-геофизический разрез земной коры Якутского поднятия по линии профиля “Березово–Усть-Мая” в виде трехслойной модели, верхний слой которой осложнен рифтогенными структурами архейских зеленокаменных поясов глубиной до 15 км.

По опорному профилю 3-ДВ “Сковородино–Томмот–Хандыга–Адыгалах” в 2008–2010 гг. был выполнен комплекс сейсмических исследований (МОВ-ОГТ, КМПВ, ГСЗ), методика полевых работ и методы обработки полученных данных охарактеризованы в работах [4, 5, 19, 22, 32]. Стандартная обработка сейсмических материалов с построением временного (до 24 с) и глубинного сейсмического разреза была выполнена на основе программного комплекса ProMAX 2D/3D, а нестандартная обработка данных МОВ–ОГТ на основе программных комплексов StremSDS [5] и РеапакРК+ [22].

По материалам ГСЗ и МПВ методом двумерного лучевого трассирования [44] для интервала 1250–1650 км профиля 3-ДВ была разработана скоростная модель земной коры и верхней мантии [32]. По данным интерпретации материалов КМПВ с учетом влияния на результаты динамического пересчета кривизны профилей, рельефа местности и рефракции сейсмических волн построен разрез осадочного чехла в интервале 700–1500 км профиля 3-ДВ [19].

Линия профиля в интервале 50–700 км пересекает Алдано-Становой щит, в интервале 700–1630 км – северо-восточную часть Алданской антеклизы, а на отрезке 1630–2100 км – Верхоянский складчато-надвиговый пояс (см. рис. 1).

Слоисто-блоковая модель земной коры интервала 900–1650 км профиля 3-ДВ приведена в работе [12]. Коромантийными разломами консолидированная кора разбита на три блока, различающиеся главным образом возрастом пород верхнего слоя. Так, возраст коры центрального блока (интервал 1100–1300 км) оценивается как раннепротерозойский, а сопредельных блоков – позднепротерозойский.

Е.Ю. Гошко с соавт. [4] представили материалы сейсморазведки ОГТ по результатам обработки в программном комплексе StremSDS, позволивших получить частотно-энергетические характеристики локальных интерференционных волновых пакетов, природа которых связана с физическим состоянием некоторой области зем-

ной коры заданного размера (рис. 7, а). По интерпретации этих данных интервал профиля 700–1050 км был рассмотрен как аккреционная призма, сформированная при закрытии архейского океана в результате продвижения Батомгского блока в западном направлении.

Д.И. Рудницкой с соавт. [22] была разработана блоково-слоистая модель коры Алданской антеклизы в интервале 700–1400 км на основе обработки МОВ-ОГТ по полям отраженной энергии среднего уровня разрешенности (рис. 7, б). В данной модели земная кора коромантийными разломами разбита на три макроблока, в среднем макроблоке на глубине 15–30 км выделена область низких значений отраженной энергии и структурных атрибутов, образование которой объясняется концентрацией мантийных флюидов. По высокой степени акустической дифференциации среды выше границы Мохоровичича оконтурен слой рефлексивности мощностью до 10 км, отмечается присутствие надвиговых структур в интервале 1100–1400 км, подтверждающих его сложное строение.

Таким образом, гравитационное и магнитное поле северо-восточной части Алданской антеклизы информативны в отношении разработки структуры кристаллического фундамента. Полученный материал по результатам обработки и интерпретации сейсмических данных Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ дает возможность проведения комплексного анализа совместно с другими геофизическими методами глубинного строения и структурных особенностей земной коры северо-востока Алданской антеклизы.

СТРОЕНИЕ СЕВЕРО-ВОСТОКА АЛДАНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

По результатам анализа гравитационного поля и сейсмических материалов рассмотрена структура кристаллического фундамента северо-восточной части Алданской антеклизы и ее глубинное строение. Линия Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ в северо-восточном направлении пересекает северный склон Алдано-Станового щита и осложненное Якутским и Таттинским выступами Якутское поднятие кристаллического фундамента Алданской антеклизы, которое на протяжении неопротерозоя и палеозоя представляло собой область, где осадочные отложения не накапливались либо они были размывы [33].

Структура кристаллического фундамента

Схема строения кристаллического фундамента северо-востока Алданской антеклизы разработана на базе концепции блоковой делимости

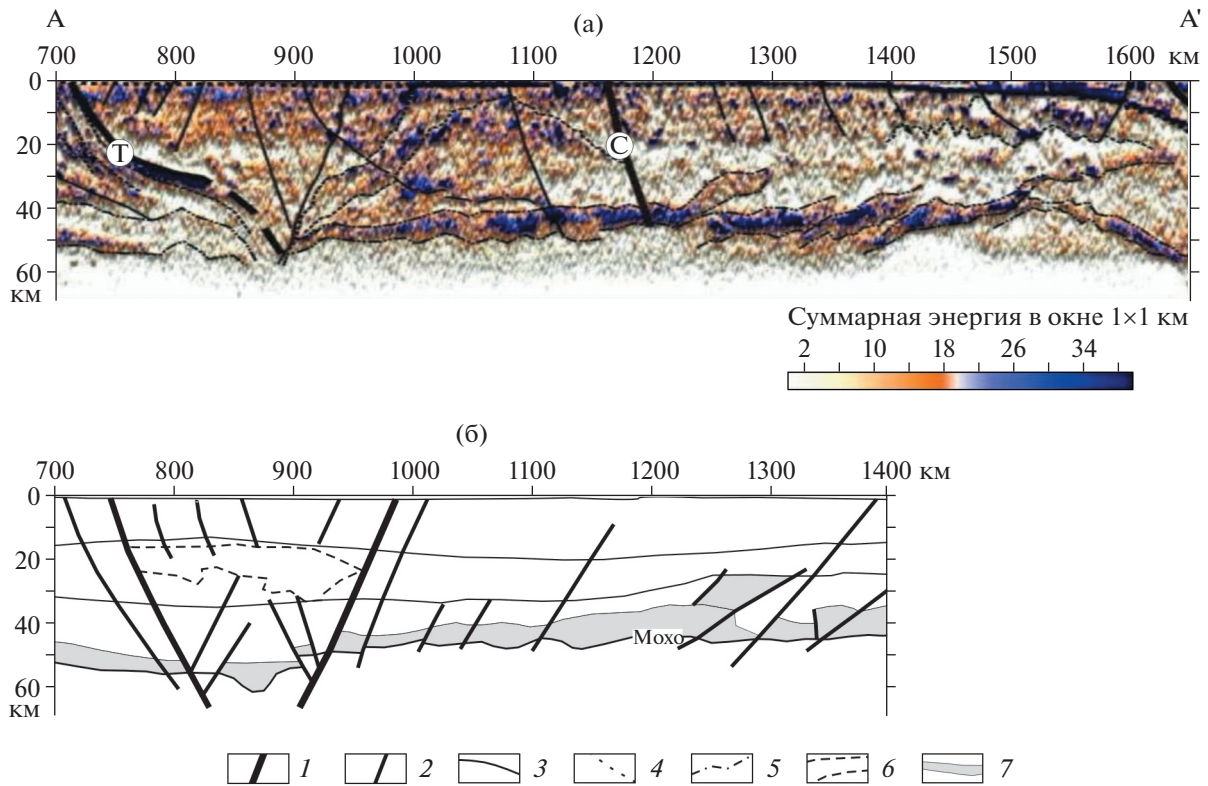


Рис. 7. Геолого-геофизические разрезы земной коры Алданской антеклизы по линии Якутского отрезка А–А' опорного профиля 3–ДВ (по данным [4, 22], с изменениями и дополнениями). (а) – разломы: Т – Тыркандинский; С – Суольский. 1–2 – разломы: 1 – главные, 2 – второстепенные; 3–5 – структурные линии внутри коры; 6 – область низких значений отраженной энергии и структурных атрибутов; 7 – слой рефлексивиты

земной коры (геоблок, мегаблок, блок I порядка), при этом учитывались характерные черты отражения структурно-вещественных комплексов и тектонических нарушений раннедокембрийской коры Алдано-Станового щита в гравитационном и магнитном полях [27, 28].

К основным критериям выделения тектонических нарушений в поле силы тяжести отнесены протяженные зоны повышенных горизонтальных градиентов (гравитационные ступени) амплитудой 10–20 этвеш и более, а также линейные гравитационные минимумы, например, Тыркандинский. В аномальном магнитном поле за критерии выделения тектонических нарушений приняты линейные и протяженные (более 100 км) максимумы, в их числе Якутский, Борогонский, Чурапчинский (см. рис. 6).

Консолидированная кора Алданской антеклизы рассматривается нами в границах Алдано-Станового геоблока Сибирской платформы, на северо-востоке ограниченного Нижнеалданским, а на востоке – Предсеттедабанским разломами (рис. 8). Кристаллический фундамент восточной части Алданской антеклизы Учурским разломом разделен на Тимптоно-Учурский и Батомгский мегаб-

локи, южные фрагменты которых исследованы в пределах Алдано-Станового щита. Учурский разлом щита идентифицируется по градиентным ступеням региональных аномалий гравитационного поля северо-западного простирания, а его северное продолжение соответствует градиентной зоне Тимптоно-Учурской аномальной гравитационной области с Чурапча-Билирской и Батомга-Омнинской областями (см. рис. 4).

Разделяющий Тимптоно-Учурский и Центрально-Алданский мегаблоки Тыркандинский разлом в пределах Алдано-Станового щита картируется как зона шириной до 20 км и протяженностью более 600 км интенсивного проявления процессов регрессивного метаморфизма амфиболитовой фации и гранитизации раннедокембрийских метаморфических пород, отражающаяся линейным гравитационным минимумом амплитудой до 4 мГал и линейным магнитным максимумом. По аналогии с Тыркандинским разломом возраст разломов, разграничивающих блоки кристаллического фундамента разного порядка, можно оценить как палеопротерозойский.

Субдолготные Борогонский и Якутский разломы выходят за пределы Батомгского мегаблока.

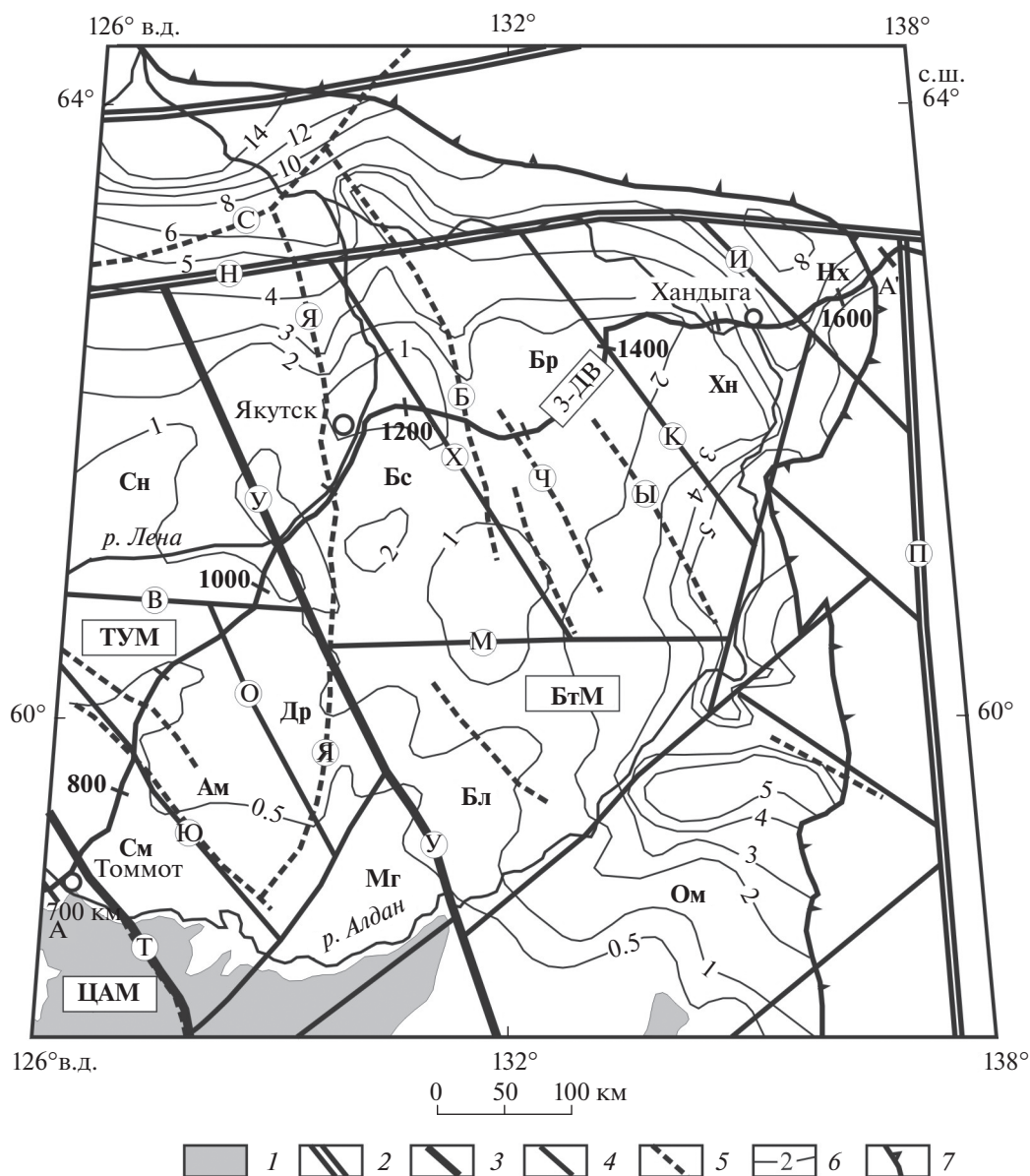


Рис. 8. Структура кристаллического фундамента восточной части Алданской антеклизы по результатам анализа геолого-геофизических материалов (изогипсы поверхности кристаллического фундамента, по [33]).

Мегаблоки: БТМ – Батомгский; ТУМ – Тимптоно-Учурский; ЦАМ – Центрально-Алданский.

Блоки: Ам – Амбардахский; Бл – Белькачинский; Бс – Бестяхский; Бр – Борогонский; Др – Дарылыкский; Мг – Межпосканский; См – Сумнагинский; Сн – Синский; Нх – Нижнеханьдгыский; Ом – Омнинский; Хн – Ханьдгыский.

Разломы: П – Предсеттедабанский; Н – Нижнеалданский; У – Учурский; Т – Тыркандинский; В – Верхнебуотомский; Ю – Юнгюэлинский; О – Оноконский; М – Мильский; Х – Хомпуйский; К – Кюэльский; И – Ивановский; Б – Борогонский; Ч – Чурапчинский; Ы – Ытыккюельский; Я – Якутский; С – Сангарский. А–А' – Якутский отрезок опорного профиля 3-ДВ.

1 – раннедокембрийские метаморфические породы Алдано-Станового щита; 2–5 – разломы: 2–4 – выделенные по гравитационному полю; 2 – межгеоблоковые, 3 – межмегаблоковые, 4 – межблоковые, 5 – выделенные по линейным максимумам аномального магнитного поля; 6 – изогипсы поверхности кристаллического фундамента (км); 7 – граница Сибирской платформы с Верхоянским складчато-надвиговым поясом

Якутский разлом пересекает Тимптоно-Учурский и Батомгский мегаблоки, на юге он ограничен Юнгюэлинским разломом, а на севере Сангарским. Такое положение Борогонского и Якутского разломов по отношению к блоковой структуре кристаллического фундамента позво-

ляет связать их образование с процессами рифейского рифтогенеза на восточной окраине Сибирской платформы.

Северную часть Батомгского мегаблока составляют Бестяхский, Борогонский, Ханьдгыский

и Нижнеханьдгыский блоки I порядка, границами между которыми являются Хомпуйский, Кюэльский и Ивановский межблоковые разломы, а его южную часть, северным ограничением которой является Мильский межблоковый разлом, — Билирский и Омнинский блоки.

Структуру северной части Тимптоно-Учурского мегаблока определяют Синский блок, ограниченный с юга Верхнебуотомским разломом от расположенных южнее Сумнагинского, Амбардахского и Дырылыкского блоков, разграниченных соответственно Юнгюэлинским и Оноконским разломами.

Таким образом, по анализу геолого-геофизических материалов структура кристаллического фундамента восточной части Алданской антеклизы представлена Центрально-Алданским, Тимптоно-Учурским и Батомгским мегаблоками Алдано-Станового геоблока.

Глубинное строение земной коры в полосе Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ

Линия Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ пересекает Центрально-Алданский, Тимптоно-Учурский и Батомгский мегаблоки кристаллического фундамента Алданской антеклизы, с учетом блоковой делимости которого и анализа сейсмических материалов МОВ-ОГТ предложена блок-схема глубинного строения консолидированной коры (см. рис. 8, рис. 9). При построении блок-схемы линия Якутского отрезка профиля в соответствии с ее направлением была разбита линейными фрагментами на следующие интервалы: 700–1170, 1170–1320, 1320–1420, 1420–1550, 1550–1650 км.

В сейсмических материалах по характеру акустической расслоенности разрез можно разделить на два отрезка: 700–1050 км и 1050–1650 км (см. рис. 9а).

В интервале 700–1050 км коррелируемые площадки отражателей формируют ряд наклонных зон, пересекающих консолидированную кору и имеющих северо-восточное (700–860 км) и юго-западное (920–1050 км) падение. К группе северо-восточных зон приурочен Тыркандинский разлом, а к второй группе — Учурский. С зонами коррелируемых площадок отражателей соотносено глубинное продолжение межмегаблоковых Тыркандинского и Учурского разломов. Тыркандинский разлом довольно отчетливо идентифицируется в материалах ОГТ до глубины 30–35 км как разлом северо-восточного падения. В пределах Алдано-Станового щита углы падения Тыркандинского разлома, рассчитанные по градиентам гравитационного поля, изменяются от 35° до 70°. Учурский разлом отнесен к категории ко-

романтийных, разделяющий мегаблоки с разным уровнем границы Мохоровичича.

Второй интервал разреза (1050–1630 км) акустически более гомогенный, коррелируемые площадки отражателей в его пределах образуют субгоризонтальные линеаменты. Этот интервал в тектоническом отношении принадлежит к Батомгской гранит-зеленокаменной области.

Разломы, разграничивающие блоки I порядка и выделенные по линейным максимумам аномального магнитного поля, в их числе Якутский и Борогонский, в сейсмических материалах не находят отражения. Возникновение этих разломов, по-видимому, происходило без существенного нарушения структурно-вещественных комплексов раннедокембрийской коры.

Мощность земной коры Якутского отрезка профиля 3-ДВ изменяется от 40 до 55 км (см. рис. 9, а). Граница Мохоровичича Центрально-Алданского и Тимптоно-Учурского мегаблоков находится на уровне 52–55 км, ее поднятие до 40–45 км происходит в пределах Батомгского мегаблока. В данном случае по нашему мнению глубина границы Мохоровичича отражает переход гранит-зеленокаменного типа земной коры к гранулит-гнейсовому типу.

АЛМАЗОНОСНОСТЬ СЕВЕРО-ВОСТОКА АЛДАНСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

Основой технологии ведения прогнозно-поисковых работ на алмазы является выявление критериев и разработка моделей региональных алмазоносных таксонов на уровне провинции и субпровинции [2]. На основе уточнения границ и обоснования структуры северного продолжения архейской Батомгской гранит-зеленокаменной области и палеопротерозойского Алданского гранулит-гнейсового пояса Алдано-Станового щита охарактеризован тип консолидированной коры северо-востока Алданской антеклизы. Северное продолжение Батомгской гранит-зеленокаменной области под платформенным чехлом подчинено Учурскому разлому, имеющему северо-западное простирание (рис. 10).

К перспективной территории на алмазоносность северо-восточной части Алданской антеклизы по комплексу геолого-геофизических данных до открытия трубки Манчары в 2007 г. было отнесено (см. рис. 10):

- Якутское поднятие кристаллического фундамента [17];
- регион Майя распространения кимберлитов [21];
- Центральноленская потенциально перспективная алмазоносная субпровинция [30].

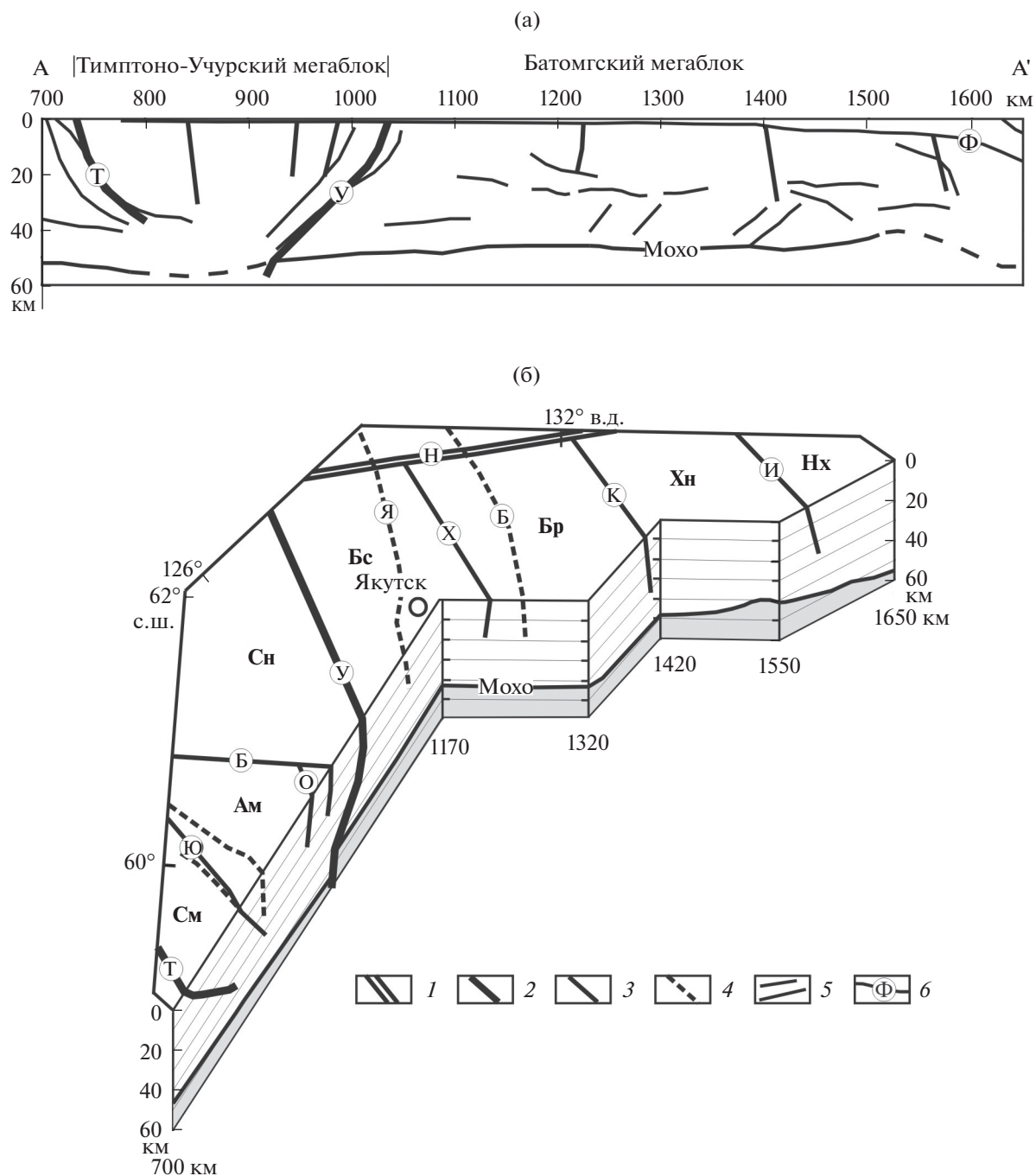


Рис. 9. Блок-схема глубинного строения северо-восточной части Алданской антеклизы в полосе Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ.

(а) – Разрез земной коры по материалам МОВ–ОГТ Якутского отрезка А–А' профиля 3-ДВ.

Разломы: Т – Тимптонский; У – Учурский.

Фундамент: Ф – поверхность кристаллического фундамента. А–А' – Якутский отрезок опорного профиля 3-ДВ. (б) – Блок-схема строения консолидированной коры в полосе Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ (структура кристаллического фундамента – см. рис. 8).

Разломы: Н – Нижнеалданский; У – Учурский; Т – Тыркандинский; Б – Буотомский; Ю – Юнгюэлинский; О – Оноконский; Х – Хомпуйский; К – Кюэльский; И – Ивановский; Б – Борогонский; Я – Якутский.

Блоки: См – Сумнагинский; Ам – Амбардахский; Сн – Синский; Бс – Бестяхский; Бр – Борогонский; Нх – Нижнехандыгский; Хн – Хандыгский.

1–4 – разломы: 1–3 выделенные по гравитационному полю: 1 – межгеоблоковые, 2 – межмегаблоковые, 3 – межблоковые, 4 – выделенные по линейным максимумам аномального магнитного поля; 5 – линеаменты, выделенные по коррелируемым площадкам отражателей; 6 – поверхность кристаллического фундамента

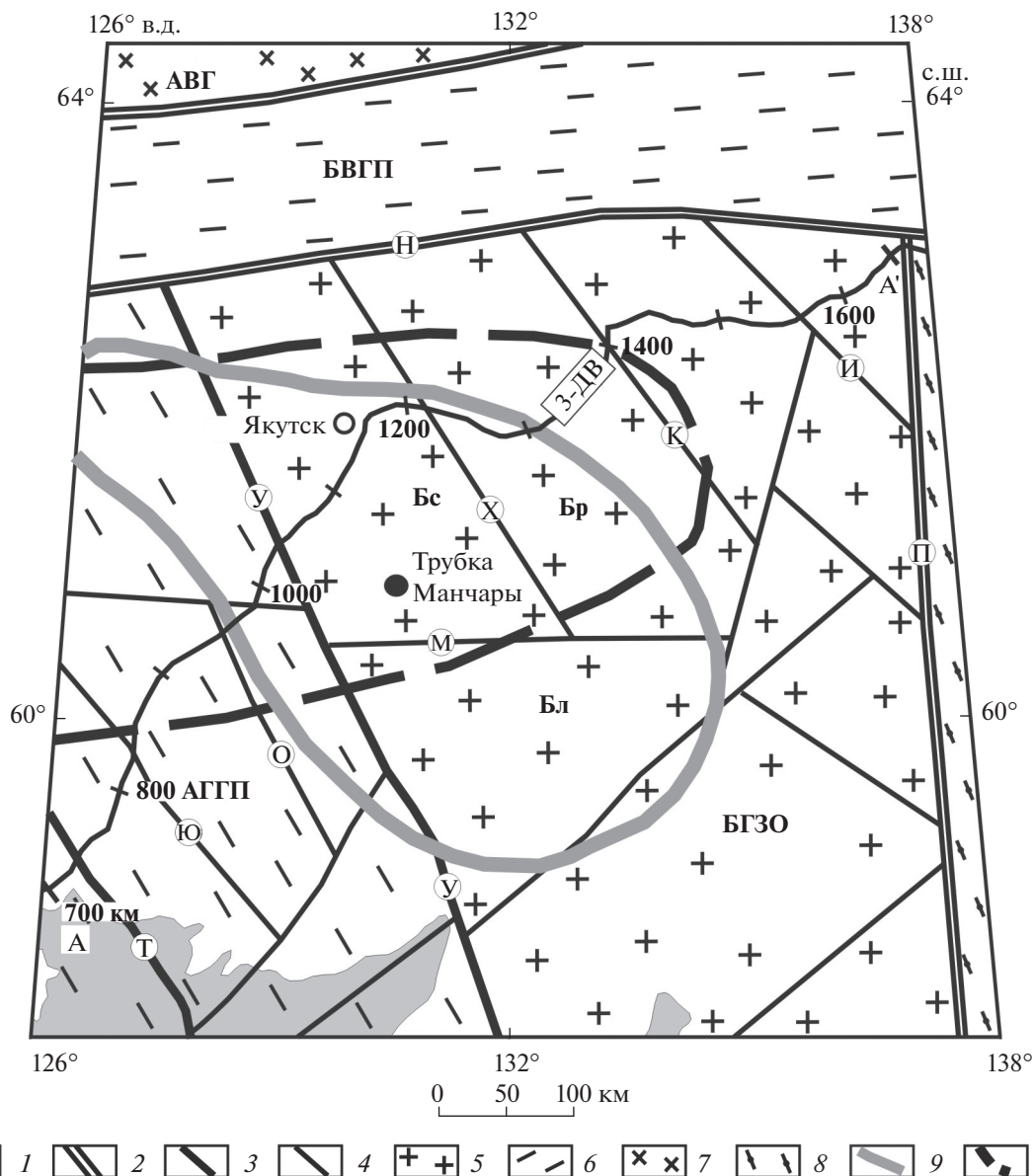


Рис. 10. Структура кристаллического фундамента северо-восточной части Алданской антеклизы в системе гранит-зеленокаменных областей и гранулит-гнейсовых поясов.

Гранит-зеленокаменная область: БГЗО – Батомгская гранит-зеленокаменная область.

Гранулит-гнейсовые пояса: АГГП – Алданский; БВГП – Байкало-Вилуйский.

Геоблоки: АВГ – Анабаро-Вилуйский.

Разломы: П – Предсеттедабанский; Н – Нижнеалданский; У – Учурский; Т – Тыркандинский; Ю – Юнгюэлинский; О – Оноконский; М – Мильский; Х – Хомпуйский; К – Кюэльский; И – Ивановский.

Блоки: Бс – Бестяхский; Бр – Борогонский; Бл – Билирский. А–А' – Якутский отрезок опорного профиля 3-ДВ.

1 – раннедокембрийские метаморфические породы Алдано-Станового щита; 2–4 – разломы: 2 – межгеоблоковые, 3 – межмегаблоковые, 4 – межблоковые; 5 – гранит-зеленокаменная область; 6 – гранулит-гнейсовые пояса; 7–8 – кристаллический фундамент геоблоков: 7 – Анабаро-Вилуйского, 8 – Южноверхоянского; 9 – Центральноленская потенциально перспективная алмазоносная субпровинция, по [30]; 10 – предполагаемый регион распространения кимберлитов Майя, по [21]

Контуры восточной части региона Майя распространения кимберлитов и Центральноленской субпровинции практически совпадают.

Центральноленская субпровинция включает Бестяхский, юго-западную часть Борогонского и Билирский блоки Батомгской гранит-зеленокаменной области. Трубка Манчары Хомпу-Май-

ского кимберлитового поля находится в пределах Бестяхского блока.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов рассмотрена

структура кристаллического фундамента и глубинное строение северо-восточной части Алданской антеклизы с оценкой региональных критериев алмазоносности.

Выполненное районирование гравитационного и магнитного полей восточной части Алданской антеклизы послужило основой для анализа структуры кристаллического фундамента с позиции блоковой делимости (геоблок, мегаблок и блоки более высокого порядка) земной коры. Понятие геоблок, как и блок любого другого ранга, не несет за собой определенной генетической связи с тектоническими процессами, их возрастной корреляции, и в каждом конкретном случае требует обоснование соответствующих моделей эволюции. В качестве главных тектонических единиц выбраны гранит-зеленокаменные области (архейские кратоны) и разделяющие их гранулит-гнейсовые (подвижные) пояса. Такой выбор определялся прогнозно-поисковым критерием данных тектонических единиц на алмазы.

Т.Н. Клиффорд, изучая закономерности размещения алмазоносных кимберлитовых трубок Африки, в 1964 г. пришел к выводу, что алмазоносные кимберлиты располагаются в пределах древних консолидированных блоков земной коры – архейских кратонов. “Правило Клиффорда” было подтверждено А.Д. Харьковом с соавт. [36], включившими в выборку все основные алмазные месторождения Мира.

Алдано-Становой щит подразделяется на архейские Олекминскую и Батомгскую гранит-зеленокаменные области, разделенные Алданским гранулит-гнейсовым поясом [34]. По анализу геолого-геофизических данных показано, что структурные элементы раннедокембрийской земной коры Алдано-Станового щита продолжают в пределах северо-восточной части Алданской антеклизы, кристаллический фундамент которой Учурским коромантийным разломом разграничен на Тимптоно-Учурский и Батомгский мегаблоки (см. рис. 8). Батомгский мегаблок по типу земной коры относится к гранит-зеленокаменной области, а Центрально-Алданский и Тимптоно-Учурский мегаблоки представляют палеопротерозойский Алданский гранулит-гнейсовый пояс. Формирование зоны Тыркандинского разлома, разделяющего Центрально-Алданский и Тимптоно-Учурский мегаблоки, происходило в интервале 2.1–1.8 млрд лет [42].

Палеопротерозойский Алданский гранулит-гнейсовый пояс сложен в пределах Алдано-Станового щита преимущественно гранитогнейсами и эндербитогнейсами, возраст метаморфизма которых оценивается в 2.3–1.9 млрд лет [13].

Гранит-зеленокаменный тип кристаллического фундамента Батомгского мегаблока подтверждают вскрытые скважиной в интервале 589–600 м

в районе г. Якутска амфиболовые сланцы, аналогичные субганскому зеленокаменному комплексу Олекминской гранит-зеленокаменной области [7]. Отметим также, что возраст гранитоидов фундамента из ксенолитов трубки Манчары соответствует 2540 ± 34 млн лет [24].

Мощность земной коры по линии Якутского отрезка опорного профиля 3-ДВ изменяется от 40 до 55 км (см. рис. 9, а). Граница Мохоровичича Алданского гранулит-гнейсового пояса находится на уровне 52–55 км, ее поднятие до 40–45 км происходит в пределах Батомгской гранит-зеленокаменной области, что аналогично мощности земной коры (30–45 км) гранит-зеленокаменных областей в различных регионах Мира [31, 39, 40, 43].

Существенное увеличение мощности земной коры Алданского гранулит-гнейсового пояса предполагалось за счет внедрения подкорового материала либо при поддвиге океанической плиты под воздействием плюмового апвеллинга [4, 37]. По нашему мнению, утолщение земной коры до 55 км связано с процессами формирования в палеопротерозое Алданского гранулит-гнейсового пояса.

Граница кора-мантия на большей части Якутского отрезка профиля 3-ДВ контрастная, исключение представляет интервал 780–920 км в зоне Тыркандинского и Учурского разломов, граница которого приобретает диффузный характер. Возникновение такой границы возможно за счет преобразования коры процессами высокотемпературного метаморфизма [15] либо за счет тектонической перестройки низов коры в зоне Учурского коромантийного разлома при формировании в палеопротерозое Алданского гранулит-гнейсового пояса. Контрастная граница кора–мантия характерна для гранит-зеленокаменных областей [38, 41]. Глубинное строение северо-востока Алданской антеклизы по Якутскому отрезку опорного профиля 3-ДВ отражает особенности эволюции раннедокембрийской земной коры от архея (Батомгская гранит-зеленокаменная область) до палеопротерозоя (Алданский гранулит-гнейсовый пояс).

Полученные материалы по структуре кристаллического фундамента и глубинному строению в полосе опорного профиля 3-ДВ позволяют сформулировать основные региональные критерии алмазоносности северо-востока Алданской антеклизы. Эталоном при этом служила хорошо изученная Якутская алмазоносная провинция, к одному из главных региональных критериев которой отнесен алмазоносный литосферный корень мощностью до 250 км [14].

Литосферный корень Якутской алмазоносной провинции в низкочастотной составляющей гравитационного поля соответствует Ленскому максимуму (см. рис. 5).

По аналогии с Ленским гравитационным максимумом в контурах Якутского максимума низкочастотной составляющей гравитационного поля предполагается литосферный корень мощностью до 220 км северо-востока Алданской антеклизы, а отвечающая ему территория рассматривается как потенциально перспективная на алмазоносность. К северной части Алданской антеклизы по уровню теплового потока Северо-Востока Азии приурочена аномалия низких ($50-20 \text{ мВт/м}^2$) значений теплового потока [1], что также является косвенным признаком большой мощности литосферы.

Трубка Манчары Хомпу-Майского кимберлитового поля расположена в пределах Бестяхского блока, в разрезе земной коры которого (интервал 1035–1310 км) по данным ОГТ опорного профиля 3-ДВ практически отсутствуют выдержанные внутрикоровые границы (рис. 9 а), что характерно для алмазодержащих блоков [9].

Таким образом, к основным критериям потенциальной алмазоносности северо-востока Алданской антеклизы относятся: наличие литосферного корня мощностью до 220 км, гранит-зеленокаменный тип земной коры, тектонически практически не расслоенная раннедокембрийская кора, а также низкие значения теплового потока. Выполненное комплексное исследование на основе привлечения и интерпретации материалов гравитационного и магнитного полей и опорного профиля 3-ДВ позволило уточнить тектоническое строение северо-востока Алданской антеклизы и сформулировать региональные критерии ее потенциальной алмазоносности.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ гравитационного и магнитного поля восточной части Алданской антеклизы на площади, ограниченной 126° и 138° восточной долготы и 58° и 64° северной широты с целью выявления особенностей строения раннедокембрийской консолидированной коры. Исходные материалы включали изданные мелкомасштабные карты гравитационного и магнитного полей, а также результаты авторов по тематическим работам и геолого-геофизической интерпретации данных гравиметрических съемок масштаба 1 : 200000 южной территории Якутии.

2. Кристаллический фундамент восточной части Алданской антеклизы Учурским коромантийным разломом разделен на Тимптоно-Учурский и Батомгский мегаблоки, южные сегменты которых изучены в пределах Алдано-Станового щита и по типу земной коры принадлежат соответственно к палеопротерозойскому Алданскому гранулит-гнейсовому поясу и архейской Батомгской гранит-зеленокаменной области.

3. Утолщение земной коры до 55 км Центрально-Алданского и Тимптоно-Учурского мегаблоков объясняется формированием в палеопротерозое Алданского гранулит-гнейсового пояса. Мощность земной коры Батомгского мегаблока находится в интервале 40–45 км, что типично для архейской гранит-зеленокаменной области.

4. В соответствии с предложенной схемой строения кристаллического фундамента восточной части Алданской антеклизы трубка Туймада Хомпу-Майского кимберлитового поля расположена в пределах Бестяхского блока Батомгской гранит-зеленокаменной области. Приуроченность Хомпу-Майского кимберлитового поля к гранит-зеленокаменной области, наличие мощной (200–220 км) ее литосферы и низкий тепловой поток позволяют положительно оценить северо-восток Алданской антеклизы на потенциально перспективную алмазоносную субпровинцию.

Благодарности. Авторы благодарны геофизикам С.В. Дунаеву, Л.И. Жуковой, А.Н. Сидоренко и К.Ю. Осиповичу (ПГО “Якутскгеология”, г. Якутск, Республика Саха (Якутия)) за совместную работу в период с 1988 по 1993 годы по результатам гравиметрических съемок масштаба 1 : 200000 Алданской антеклизы.

Авторы выражают признательность А.Н. Колтину, управляющему директору АО “Якутскгеология” (г. Якутск, Республика Саха (Якутия)) за поддержку фундаментальных исследований.

Авторы благодарны анонимным рецензентам за полезные комментарии и редактору журнала за тщательное редактирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балобаев В.Т.* Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. – Новосибирск: Наука, 1991. 193 с.
2. *Ваганов В.И., Голубев Ю.К., Прусакова Н.А.* Стадийная технология ведения геологоразведочных работ на алмазы на Восточно-Европейской платформе. – В сб.: *Геология алмаза – настоящее и будущее.* – Под ред. Н.Н. Зинчука – Воронеж: ВГУ. 2005. С. 1124–1136.
3. Геологическая карта России и сопредельных государств (в границах бывшего СССР) – М-6 1 : 5000000. – Под ред. Р.И. Соколова – СПб: ВСЕГЕИ, 1992. 2 листа.
4. *Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С.* Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры Юго-Востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ // *Геодинамика и тектонофизика.* 2014. № 3. С. 785–798.
5. *Гошко Е.Ю., Сальников А.С., Мигурский А.В.* Частотно-зависимый энергетический анализ глубинных сейсмических разрезов МОГТ для геологической интерпретации // *Геофизика.* 2011. № 1. С. 32–39.

6. Гравиметрическая карта СССР. — М-6 1 : 2500000. — Под ред. П.П. Степанова, М.А. Якушевича — М.: ВНИИ “Геофизика”, 1990. 16 листов.
7. *Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Сластенов Ю.Л., Щербатов О.И.* Геологическое строение Большого Якутска. — В сб.: *Региональная геология Якутии*. — Под ред. Ю.Л. Сластенова — Якутск: ЯГУ. 1995. С. 3–20.
8. *Гусев Г.С., Петров А.Ф., Фрадкин Г.С.* Структура и эволюция земной коры Якутии. — М.: Наука, 1985. 248 с.
9. *Егоркин А.В., Зюганов С.К., Павленкова Н.А., Чернышев Н.М.* Результаты исследования структуры литосферы на профилях Сибири // *Геология и геофизика*. 1988. № 5. С. 120–128.
10. *Егоров А.С.* Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотравверсов России). — СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 200 с.
11. Карта аномального магнитного поля России и прилегающих акваторий. — М-6 1 : 10000000. — Под ред. Т.П. Литвиновой, З.А. Макаровой — СПб.: ВСЕГЕИ, 1995. 4 листа.
12. *Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Кудрявцев И.В., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А., Эринчек Ю.М.* Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии // *Региональная геология и металлогения*. 2018. № 76. С. 9–21.
13. *Котов А.В.* Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. — Автореф. дис. ... д.г.м.-н. — (ИГГД РАН. СПб. Россия), — СПб: СПбГУ, 2003. 78 с.
14. *Манаков А.В.* Региональные геофизические критерии прогноза коренной алмазоносности. — В сб.: *Геофизика Якутии на пороге XXI века*. — Под ред. В.В. Стогния — Якутск: ЯГУ, 2001. С. 158–168.
15. *Милиц М.В.* Сейсмические образы коромантийной границы как отражение геодинамики докембрийского корообразования // *Геофизические исследования*. 2016. Т. 17. № 1. С. 65–82.
16. *Мишин В.М., Андреев А.П., Бекренев К.А., Алтухова З.А.* Новый геофизический подход к минерагеническому районированию Сибирской платформы и перспективы алмазоносности Якутского погребенного поднятия // *Литосфера*. 2011. № 5. С. 30–52.
17. *Мишин В.М., Гриненко В.С.* Геораздел Атлантик-Пацифик: главный тренд промышленно-алмазоносных таксонов большой линейной протяженности. — В сб.: *Геология алмаза — настоящее и будущее*. — Под ред. Н.Н. Зинчука — Воронеж: ВГУ, 2005. С. 132–149.
18. *Мокшанцев К.Б., Горништейн Д.К., Гудков А.А.* Глубинное строение восточной части Сибирской платформы и прилегающих складчатых сооружений Верхояно-Чукотской области. — М.: Наука, 1968. 172 с.
19. *Полянский П.О., Еманов А.Ф., Сальников А.С., Жабин В.В.* Динамический пересчет головных волн на центральном участке опорного профиля 3-ДВ: особенности методики и интерпретации временных разрезов // *Геофизические исследования*. 2018. Т. 19. № 2. С. 5–33.
20. *Розен О.М.* Сибирский кратон: тектоническое районирование, этапы эволюции // *Геотектоника*. 2003. № 3. С. 3–21.
21. *Розен О.М., Манаков А.В., Зинчук Н.Н.* Сибирский кратон: формирование, алмазоносность. — М.: Научный мир, 2006. 212 с.
22. *Рудницкая Д.И., Старосельцев В.С., Сальников А.С.* Построение макромоделей земной коры с применением Реапак-технологии по геотравверсу 3-ДВ (Восточная Сибирь) // *Геофизика*. 2013. № 1. С. 19–26.
23. *Сагир А.В.* Особенности развития и металлогения Сетте-Дабанского палеорифта // *Отечественная геология*. 1997. № 2. С. 17–23.
24. *Смелов А.П., Белоусова Е.А., Зайцев А.И., Олейников О.Б., Павлушин А.Д., Опарин Н.А.* Первые данные о составе и возрасте погребенного фундамента Алданской антеклизы (Сибирская платформа): результаты датирования ксеногенного циркона из кимберлитовой трубки Манчары // *Отечественная геология*. 2013. № 5. С. 68–72.
25. *Смелов А.П., Габышев В.Д., Ковач В.П., Котов А.Б.* Общая структура фундамента восточной части кратона. — В кн.: *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. — Под ред. Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина — М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. С. 108–112.
26. *Соболев А.Е.* Хандыгская кольцевая тектономагматическая макроструктура // *Геология и геофизика*. 1985. № 3. С. 33–39.
27. *Стогний В.В., Стогний Г.А.* Тектоническая расчлененность Алдано-Станового геоблока. — Новосибирск: Наука, 1997. 151 с.
28. *Стогний Г.А., Стогний В.В.* Геофизические поля восточной части Северо-Азиатского кратона. — Якутск: Сахаполиграфиздат, 2005. 174 с.
29. *Стогний Г.А., Стогний В.В.* Региональные неоднородности литосферы Северо-Азиатского кратона // *Геофизика*. 2009. № 6. С. 59–65.
30. *Стогний Г.А., Стогний В.В.* Региональные критерии прогноза кимберлитовых субпровинций востока Сибирской платформы на основе интерпретации гравимагнитных материалов. — В сб.: *Рудогенез и металлогения Востока Азии*. — Под ред. В.А. Труниловой — Якутск: Изд-во ЯГУ, 2006. С. 188–191.
31. *Суворов В.Д., Корнилова З.А.* Глубинное строение Алданского щита по данным сейсмологии близких землетрясений // *Геология и геофизика*. 1985. № 2. С. 86–93.
32. *Суворов В.Д., Мельник Е.А.* Сейсмическая структура земной коры в зоне сочленения Сибирского кратона и Верхояно-Колымской складчатой системы // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018. Т. 4. С. 264–271.
33. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. — Под ред. Л.М. Парфенова, М.И. Кузьмина — М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 571 с.

34. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов. — Под ред. Л.П. Карсакова, Ч. Чжао, Ю.Ф. Малышева, М.В. Горошко — Владивосток—Хабаровск: ДВО РАН, 2005. 264 с.
35. Тектоническая карта Якутской АССР и сопредельных территорий. — М-б 1 : 1 500000. — Под ред. К.Б. Мокшанцева — М.: ГУГК, 1976. 6 листов.
36. *Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.* Коренные месторождения алмазов Мира. — М.: Недра, 1998. 555 с.
37. *Хераскова Т.Н., Яковлев Д.В., Пиманова Н.Н., Березнер О.С.* Строение Алданского щита и зоны его сочленения с Центрально-Азиатским складчатым поясом по геофизическим данным интерпретации трансектов “3-ДВ” и “Тында—Амурзет” // Геотектоника. 2018. № 1. С. 3–27.
38. *Cook F.A., White D.J., Jones A.G., Eaton D.W.S., Hall J., Clowes R.M.* How the crust meets the mantle: Lithoprobe perspectives on the Mohorovičić discontinuity and crust–mantle transition // *Can. J. Earth Sci.* 2010. Vol. 47. P. 315–351.
39. *Kennett B.L.N., Saygin E., Fomin T., Blewett R.* Deep crustal seismic reflection profiling: Australia 1978–2011.— In: *ANUE Press and Commonwealth of Australia (Geoscience Australia)*, (Publ. House, Canberra, Australia. 2013), 170 p.
40. *Kuusisto M., Kukkonen I.T., Heikkinen P., Pesonen L.J.* Lithological interpretation of crustal composition in the Fennoscandian Shield // *Precambrian Research.* 2006. Vol. 420. P. 283–299.
41. *Singh A., Singh C.* Seismic imaging of the deep crustal structure beneath Eastern Ghats Mobile Belt (India): Crustal growth in the context of assembly of Rodinia and Gondwana supercontinents // *Precambrian Research.* 2019. Vol. 331. No. 1. P. 105343.
42. *Smelov A.P., Timofeev V.F.* The age of the North Asian Cratonic basement: an overview // *Gondwana Research.* 2007. No. 12. P. 279–288.
43. *Srijayanthi G., Ravi Kumar M., Gahalaut V.K.* A review of seismological research in India during the past five years (2015–2019) // *Proc. Indian Nation. Sci. Acad.* 2020. Vol. 86. No. 1. P. 531–552. <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2020/49794>
44. *Zelt C.A., Smith R.* Seismic travelt ime inversion for 2D crustal velocity structure // *Geophys. J. Int.* 1992. Vol. 108. No. 1. P. 16–34.

Structure of the Earth’ Crust in the Northeast of the Aldan Antecline (Siberian Platform): Diamond Potential

G. A. Stogny^a, V. V. Stogny^{a, b, *}

^a*Kuban State University, bld. 149 Stavropolsky str., 350040 Krasnodar, Russia*

^b*Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences (GPI VSC RAS), bld. 93a Markova str., 362002 Vladikavkaz, Russia*

**e-mail: stogny_vv@mail.ru*

The analysis of the gravitational and magnetic field of the Aldan antecline of its eastern part in the area bounded by longitudes 126° and 138° E and latitudes 58° and 64° N, and seismic data along the reference profile 3-DV “Tomnot–Khandyga”, were carried out in order to identify structural features of the Early Precambrian consolidated crust and assessment of the potential diamond content of the territory. It’s shown that the crystalline basement by the Uchur crust–mantle fault is divided into the Paleoproterozoic Aldan granulite–gneiss belt and the Archean Batomga granite–greenstone region; the southern segments were studied within the Aldan–Stanovoy shield. The processes of formation in the Paleoproterozoic of the Aldan granulite–gneiss belt contributed to an increase in the thickness of the earth’s crust (to 50–52 km) compared to the Archean Batomga granite–greenstone region (42–45 km). The Khompu–Maya kimberlite field with the Tuymada pipe is confined to the Bestyakhsky block of the Batomga granite–greenstone region. The main regional criteria for the potential diamond content of the identified sub-province of the northeast of the Aldan antecline include: (i) the presence of a lithospheric root up to 220 km thick, (ii) the granite–greenstone type of the earth’s crust, and (iii) low values of the heat flow.

Keywords: Aldan antecline, granulite–gneiss belt, granite–greenstone region, crystalline basement, gravity field, magnetic field, seismic section, diamond content

УДК 551.243.6(470.56)

РАДИАЛЬНО-КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ФУНДАМЕНТЕ ДРЕВНЕЙ ПЛАТФОРМЫ И УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОЧАГОВ ГЕНЕРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ: РЕКОНСТРУКЦИЯ ПО СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2022 г. Е. А. Данилова^{1, 2, *}¹Институт геофизики им. академика Ю.П. Булашевича УрО РАН,
д. 100, ул. Амундсена, 620016 Екатеринбург, Россия²Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,
д. 15, ул. Академика Вонсовского, 620016 Екатеринбург, Россия

*e-mail: yevgeniya.antoninova@bk.ru

Поступила в редакцию 01.10.2021 г.

После доработки 27.02.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2022 г.

Проведено исследование выявления очагов генерации углеводородов современными методами. Рассматриваются радиально-концентрические структуры фундамента Восточно-Европейской платформы как потенциальные очаги генерации углеводородов. На примере юго-запада Оренбургской области изучены сейсмогеологические признаки и тектонические условия их возникновения и распространения. Приведена интерпретация временных региональных сейсмических профилей региона исследования, проведенная с применением метода последовательных приближений и детализации, а также анализа геолого-геофизических и дистанционных работ. Установлено, что в районах распространения геодинамически активных очагов генерации углеводородов в осадочном чехле на временных разрезах сейсмических профилей присутствуют структуры “цветкового” типа. Над скоплениями углеводородов соли кунгурского яруса нижней перми образуют крупные купола (район Восточно-Оренбургского геодинамически активного очага, нефтегазовых месторождений Предуральяского краевого прогиба и зоны его сочленения с Восточно-Европейской платформой) или приподнимаются в пределах блоков, ограниченных тектоническими нарушениями (район Западно-Оренбургского геодинамически активного очага, нефтегазовых месторождений Соль-Илецкого свода). Ниже кровли девонских отложений в зонах простираения залежей углеводородов отмечается хаотическая субвертикально направленная локально усиленная сейсмическая запись, распространяющаяся глубже отражающего горизонта, отождествляемого с кровлей пород фундамента. По структурным построениям, с учетом конфигурации месторождений углеводородов, получена схематическая сеть разломов фундамента, генетически связанная с новейшими тектоническими сдвигами. Месторождения и выявленные сейсморазведочными работами структуры имеют закономерное распределение внутри четырех крупных радиально-концентрических структур. Построения подтверждены результатами мониторинга современных геотектонических процессов и дешифрирования космических снимков. Предполагаем, что центры структур являются очагами генерации углеводородов, имеют геодинамическую активность, при этом по зонам радиальных и концентрических разломов происходит миграция углеводородов. По аналогии с Оренбургским тектоническим узлом выделено еще несколько крупных центров аккумуляции углеводородов, в пределах которых целесообразно продолжать поисково-разведочные работы на нефть и газ.

Ключевые слова: древняя платформа, очаги генерации углеводородов, радиально-концентрические структуры, временные сейсмические разрезы, фундамент, осадочный чехол, неотектонические сдвиговые деформации, соляные структуры, месторождения нефти и газа

DOI: 10.31857/S0016853X22030043

ВВЕДЕНИЕ

Результаты современных дистанционных методов изучения строения нашей планеты позволяют уточнить форму известных структур и обратить внимание на плохо изученные кольцевые и

дугообразные тектонические образования, отражающиеся в элементах ландшафта. По мнению некоторых исследователей, дешифрируемые по космическим снимкам кольцевые структуры, являются проявлением глубинных зон нарушений фундамента, дают информацию о современных

неотектонических процессах и, возможно, связаны с процессами очаговой геодинамики, мантийного диапиризма и вулканизма [3, 16, 17, 21, 23].

Многие геологи находят связь кольцевых структур с особенностями распределения залежей полезных ископаемых по площади. Радиально-концентрические структуры – это поисковый признак при обнаружении месторождений алмазов, редкометалльных карбонатитов, графитов, каменных углей и др. [16, 17, 21, 23]. Часть современных исследователей находит связь радиально-концентрических структур с месторождениями нефти и газа, предполагая, что структуры представляют собой зоны разуплотнения, насыщенные флюидами. Их центры считаются очагами генерации углеводородов и имеют геодинамическую активность. Зоны радиальных и концентрических разломов – путями миграции углеводородов [17, 21, 23].

Связь разломов с месторождениями нефти и газа геологи выявляют во всем мире [24–29]. В Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, приуроченной к древней Восточно-Европейской платформе, в 1990-х годах геологи обнаружили подток новых порций углеводородов в залежи, находящиеся в эксплуатации более 50-ти лет, а также районирующее значение линеаментов при размещении запасов углеводородов [2–4, 14, 18, 20].

В платформенном Оренбуржье была проведена корреляция разломов и скоплений залежей углеводородов, но связь кольцевых концентрических структур с месторождениями нефти и газа не отмечали [5, 22]. Автором статьи было установлено, что большая часть месторождений нефти и газа юго-запада Оренбургской области – это приразломные горстовидные поднятия, связанные с коллекторами трещинного типа [6]. Автором также было предположено, что во время последней тектонической активизации вся территория Оренбуржья подверглась сдвигам, которые сопровождалась формированием в осадочном чехле неотектонических структур “цветка” [6]. Мы обратили внимание и на тот факт, что простирания залежей углеводородов вокруг Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения имеют доминирующие концентрические и дугообразные направления (рис. 1).

Целью нашего исследования является выявление и изучение радиально-концентрических структур фундамента Восточно-Европейской платформы, условий возникновения очагов концентрации углеводородов, положения нефтегазовых месторождений на территории юго-запада Оренбургской области России, а также предлагается разработанный авторский метод выделения очагов генерации углеводородов в фундаменте древних платформ по сеймотектоническим данным и реконструкциям тектонических структур.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

В современном тектоническом плане Восточно-Европейская платформа на юго-западе Оренбургской области представлена Волго-Уральской антеклизой и Предуральским краевым прогибом. Волго-Уральская антеклиза подразделяется на Восточно-Оренбургское сводовое и Соль-Илецкое поднятия по субширотному Оренбургскому разлому.

С севера к Соль-Илецкому выступу примыкает Бузулукская впадина. Южную часть области частично обрамляет северо-восточное окончание Прикаспийской впадины (см. рис. 1).

Данных о составе и возрасте пород фундамента (архей–протерозой) оренбургской части Восточно-Европейской платформы и Предуральского краевого прогиба на сегодняшний день очень мало из-за значительных глубин его залегания (от 5 до 20 км) [8]. По данным бурения скважин на Восточно-Оренбургском сводовом поднятии, верхняя часть кристаллического фундамента сложена гнейсами и гранито-гнейсами различного состава (биотитовыми, биотит-рогообманковыми, гранат-биотитовыми и др.). В верхней части докембрийских кристаллических пород развита кора выветривания мощностью до 20 м, представленная выветрелыми гнейсами. Фундамент Предуральского краевого прогиба по меридиональным разломам погружается от бортовых зон к центральной части, Прикаспийская впадина опущена относительно Волго-Уральской антеклизы на глубину 6 км и более [6].

Мощность терригенно-карбонатного осадочного чехла (нижний ордовик–кайнозой) региона исследования возрастает с севера на юг. Его геологическое строение осложнено солянокупольной тектоникой. Протяженные соляные гряды кунгурских отложений вытянуты вдоль бортовых зон сочленения Соль-Илецкого поднятия с Прикаспийской впадиной и Предуральским краевым прогибом [6] (см. рис. 1).

В 2021 г. на основе системно-геодинамического дешифрирования космических снимков по ландшафтными индикаторам была впервые предпринята попытка выделить основные геодинамически активные очаги генерации углеводородов Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения [20].

Были выявлены два очага генерации углеводородов (см. рис. 1):

- Восточно-Оренбургский;
- Западно-Оренбургский.

В том же году автором было изучено глубинное строение данных очагов генерации углеводородов по сейморазведочным данным [7].

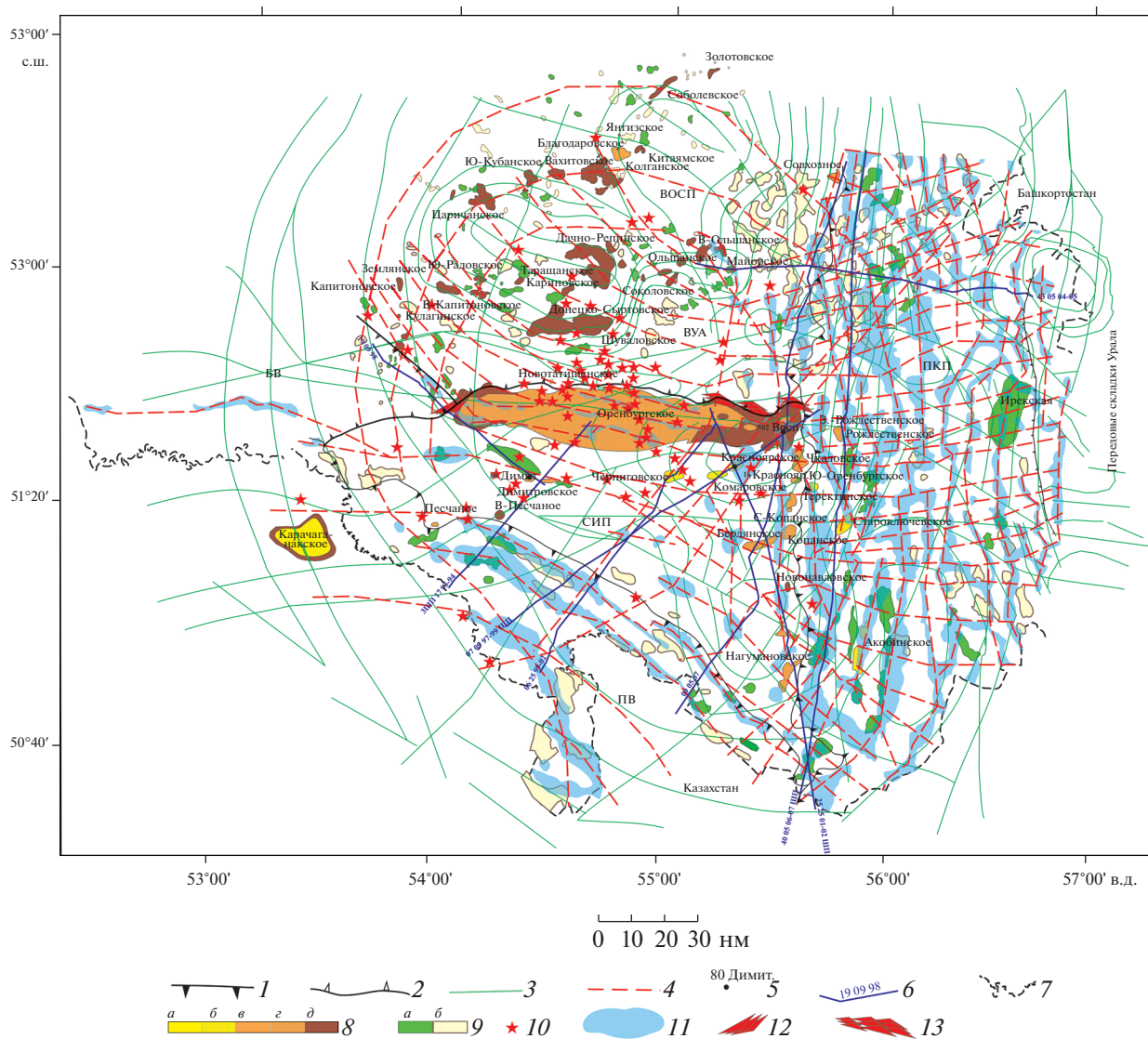


Рис. 1. Схема тектонических элементов южной части Восточно-Европейской платформы (юг Оренбургской области), (по данным [6, 7, 12], с изменениями и дополнениями).
 Обозначено: ВУА – Волго-Уральская антеклиз; ПВ – Прикаспийская впадина; ПКП – Предуральский краевой прогиб; ВОСП – Восточно-Оренбургское сводовое поднятие; БВ – Бузулукская впадина; СИП – Соль-Илецкое поднятие; 1–2 – границы структур: 1 – фундамента Русской платформы (надпорядковых), 2 – в осадочном чехле (первого порядка); 3 – тектонические нарушения по результатам дешифрирования; 4 – схематическая сеть предполагаемых разломов; 5 – скважины, их номера и название площади; 6 – линии сейсмических профилей и их номера; 7 – граница Оренбургской области; 8 – месторождения: а – газовые, б – газоконденсатные, в – газонефтяные, г – нефтегазоконденсатные; д – нефтяные; 9 – структуры в подсолевых отложениях: а – подготовленные, б – выявленные; 10 – эпицентры сейсмических событий, по [19]; 11 – соляные структуры кунгурского возраста; 12–13 – геодинамически активный очаг генерации углеводородов, по [20]; 12 – Западно-Оренбургский, 13 – Восточно-Оренбургский; 14 – изометричные структуры, выделенные по геоморфологическим данным, по [1]

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения других очагов генерации углеводородов в фундаменте юго-запада Оренбургской области была проведена обновленная интерпретация временных региональных сейсмических, выполнено дешифрирование космического снимка, проведен анализ геоморфологических и сей-

смотектонических данных [1, 10, 11] (см. рис. 1, рис. 2).

Для выделения разломов использовался авторский метод последовательных приближений и детализации, учитывались все возможные признаки тектонических дислокаций. В мелком масштабе на временном сейсмическом разрезе региональных

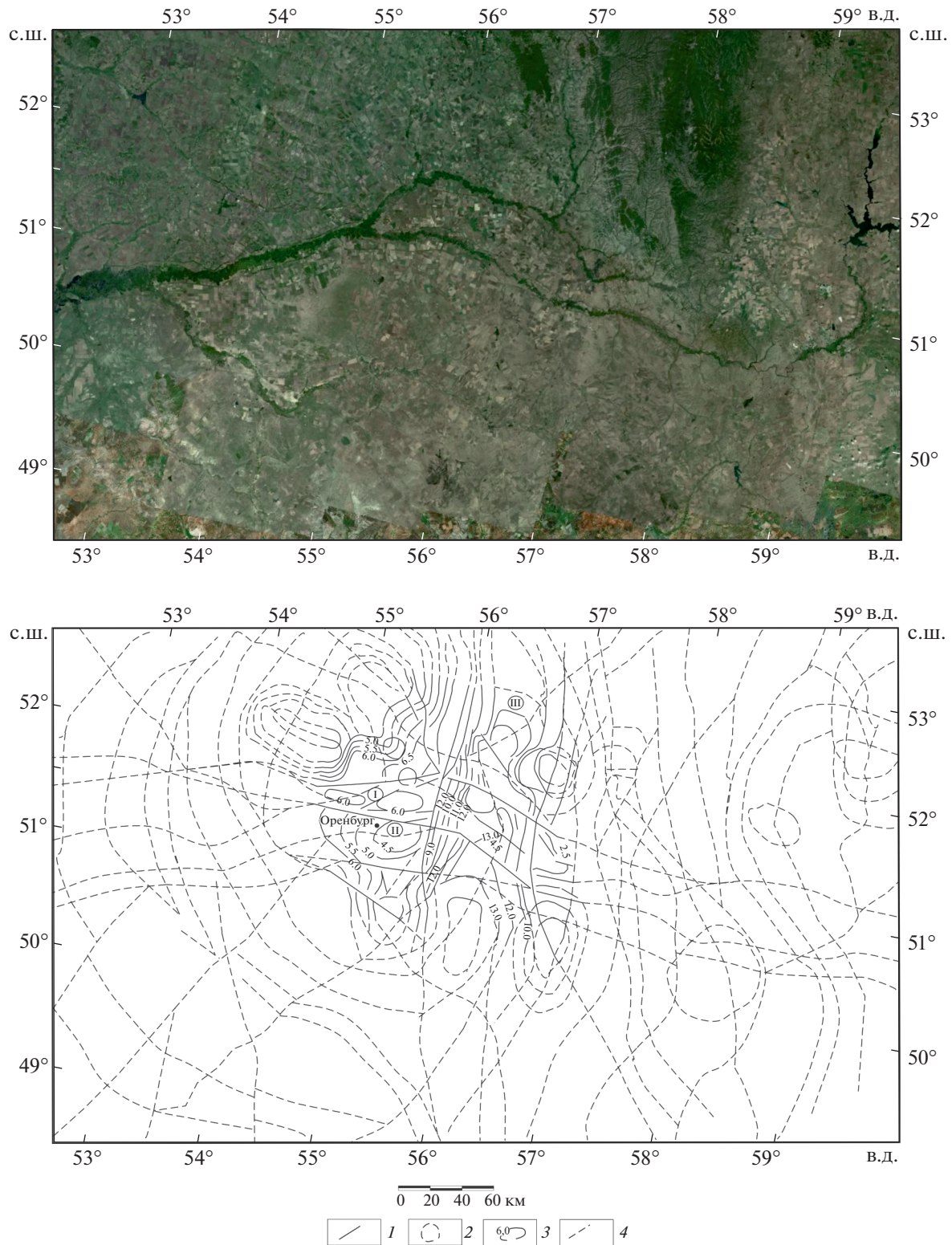


Рис. 2. Карта-схема геологического строения Оренбургской радиально-концентрической структуры по результатам дешифрирования космического снимка (по данным [2, 30], с изменениями и дополнениями).

Обозначены тектонические структуры: I – Оренбургский вал, II – Соль-Илецкое поднятие, III – Предуральский краевой прогиб.

1 – линейменты (по данным [3]); 2 – изометричные образования, выявленные при дешифрировании космического снимка; 3 – изогипсы рельефа поверхности фундамента, км (по данным [3]); 4 – тектонические нарушения, выявленные при дешифрировании космического снимка (по данным [30])

профилей наносились наиболее явно выделяющиеся разломы. По мере увеличения масштаба возрастала детальность интерпретации, выявлялись более мелкие тектонические нарушения. Затем проводилась отбраковка лишних элементов, исходя из основных признаков обнаружения тектонических деформаций [8]:

- изменение гладкости границ;
- характер напластования пород;
- хаотичность фаз;
- смещение и разрыв наклонных осей синфазности регулярных отраженных волн;
- появление нерегулярных, наклонных осей синфазности регулярных отраженных волн;
- потеря или ухудшение корреляции регулярных отраженных волн,
- локальное усиление нерегулярных волн.

При интерпретации региональных профилей учитывались основные сейсмогеологические признаки обнаружения геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте, которые [7]:

- безусловно расположены в районах распространения залежей углеводородов в осадочном чехле, при этом месторождения на временных разрезах сейсмических профилей представлены неотектоническими структурами “цветкового” типа;
- контролируются глубинными разломами;
- связаны с соляно-купольными структурами.

Детальная корреляция основных отражающих горизонтов проводилась с учетом выделенных нарушений. После чего выполнялся комплексный анализ результатов сейсморазведочных, гравиразведочных, газогеохимических работ, дешифрирования космических снимков в районе исследования.

Для переинтерпретации были выбраны региональные сейсмические профили, т.к. сейсморазведочные работы МОГТ 3D, проведенные на некоторых месторождениях углеводородов в 2000-х годах, ограничиваются исследованием осадочного чехла и практически не дают представления о строении фундамента.

Дешифрирование космического снимка проводилось на основе результатов дистанционных работ 1983 года [3] (см. рис. 2). Анализ геоморфологических данных выполнялся по схеме, отображающей крутизну склонов рельефа Волго-Уральской антеклизы [1].

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

Региональные сейсмические профили отражают строение зоны сочленения Соль-Илецкого выступа и Прикаспийской впадины и пересекают

нефте- и газоконденсатные месторождения [6, 7, 12] (см. рис. 2):

- Димитровское (нефтегазоконденсатное);
- Черниговское (газоконденсатное);
- Комаровское (газоконденсатное);
- Красноярское (газоконденсатное).

Комаровское и Красноярское газоконденсатные месторождения интерпретируются как единая залежь (см. рис. 2).

Через Бузулукскую впадину и Соль-Илецкий выступ трассируется региональный профиль, частично пересекающий Западно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов и Димитровское нефтегазоконденсатное месторождение [20].

Региональные сейсмические профили характеризуют глубинное строение зоны сочленения Волго-Уральской антеклизы и Предуральского краевого прогиба и пересекают [6, 7, 20] (см. рис. 1):

- Майорское нефтяное месторождение, а также Бердянское, Нагумановское и Рождественское нефтегазоконденсатные месторождения;
- Теректинское и Староключевское газоконденсатные месторождения;
- Восточно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов.

Региональные сейсмические профили характеризуют тектоническое строение разных зон и имеют общие закономерности. В районах простирания залежей нефти и газа, геодинамически активных очагов генерации углеводородов в осадочном чехле на временных разрезах сейсмических профилей присутствуют структуры “цветкового” типа [6, 7].

Над скоплениями углеводородов соли кунгурского яруса нижней перми образуют крупные купола (район Восточно-Оренбургского геодинамически активного очага, месторождений Предуральского краевого прогиба и зоны его сочленения с Восточно-Европейской платформой) или приподнимаются в пределах блоков, ограниченных тектоническими нарушениями (район Западно-Оренбургского геодинамически активного очага, месторождений Соль-Илецкого свода) (см. рис. 1, рис. 3, рис. 4).

Ниже кровли девонских отложений в зонах простирания залежей углеводородов отмечается хаотическая субвертикально направленная локально усиленная сейсмическая запись, распространяющаяся глубже отражающего горизонта, отождествляемого с кровлей пород фундамента (см. рис. 3, см. рис. 4).

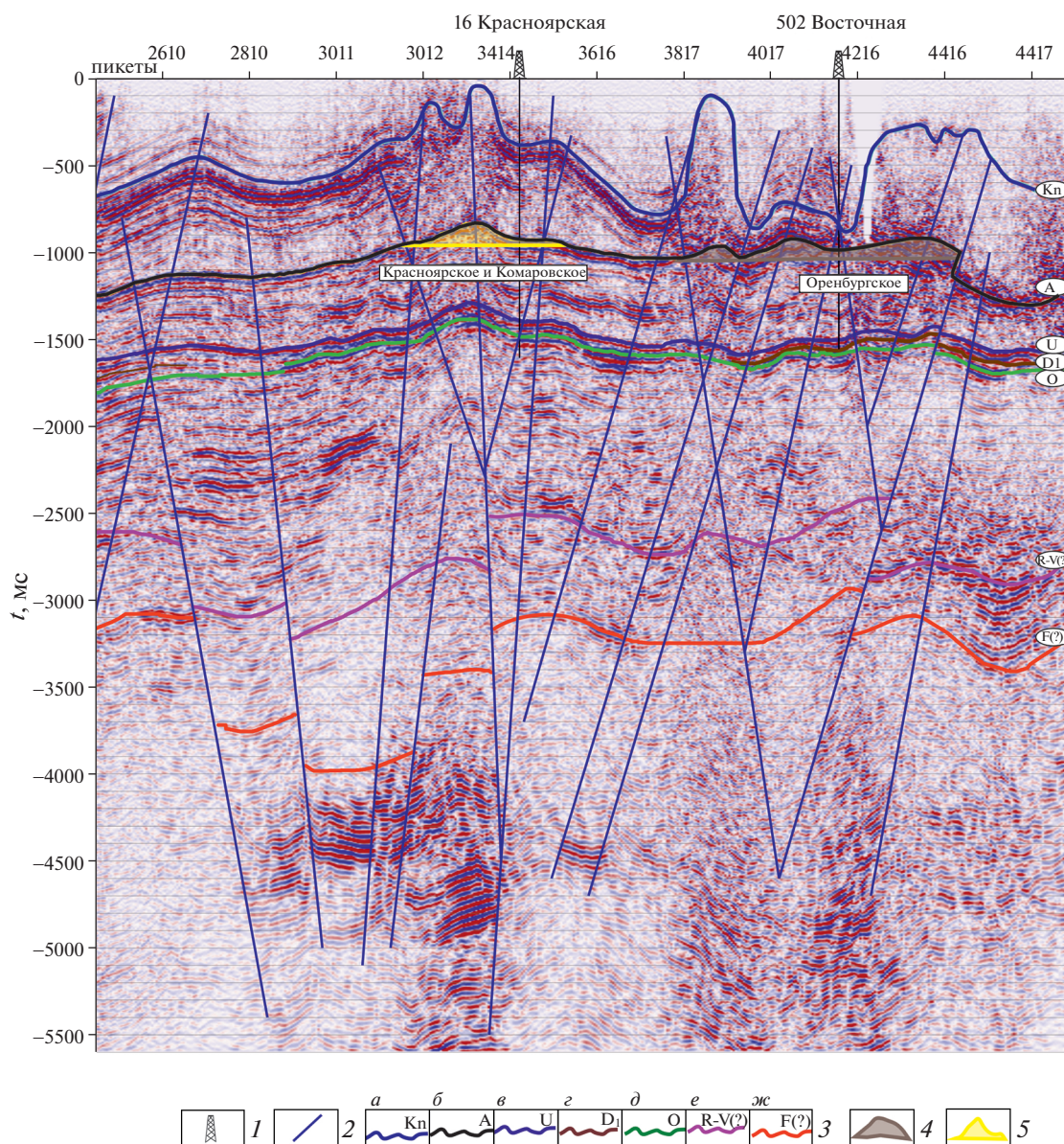


Рис. 3. Временной сейсмический разрез по региональному профилю, пересекающему Восточно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов и единую залежь Комаровского и Красноярского газоконденсатных месторождений (по данным [7]).

1 – скважина глубокого бурения; 2 – предполагаемые тектонические нарушения; 3 – отражающие поверхности: *a* – кровля пород кунгурского яруса, *б* – кровля подсолевых пород, *в* – кровля отложений бобриковского горизонта, *г* – кровля отложений нижнего девона, *д* – кровля ордовикских отложений, *е* – кровля рифей-вендских отложений, *жс* – кристаллический фундамент; 4 – Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение (Восточно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов, по [20]); 5 – газоконденсатные месторождения: *a* – Красноярское, *б* – Комаровское

Следовательно, схема

“глубинный разлом → залежь углеводородов → соляная структура”

может быть применена при картировании очагов генерации углеводородов.

По структурным построениям в юго-западной части Оренбургской области мы наметили основ-

ные векторы простираения соляных гряд и пере-мычек между ними, одновременно учли позицию и конфигурацию залежей углеводородов и структур, выявленных сейсморазведочными работами [6, 7, 12].

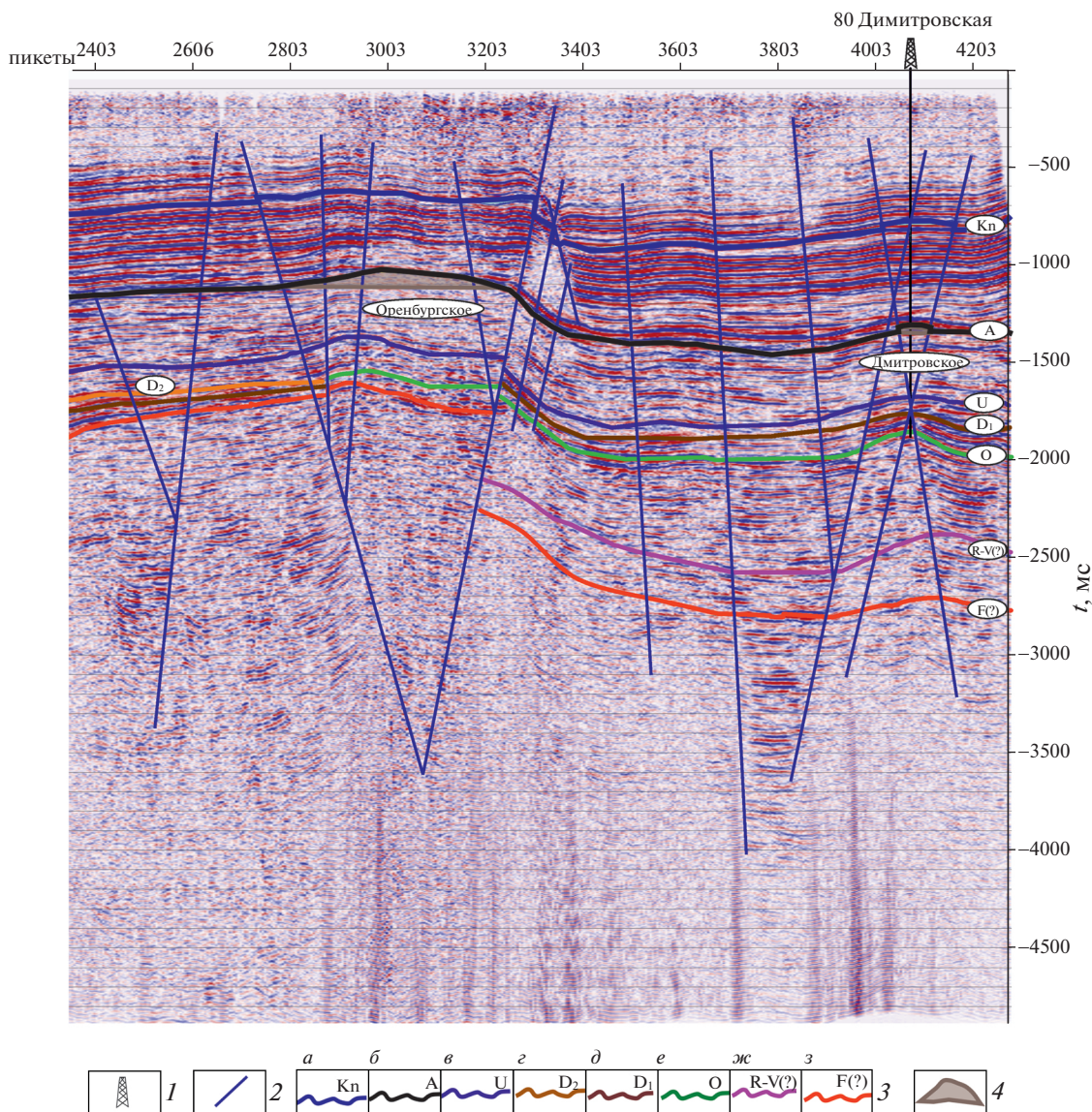


Рис. 4. Временной сейсмический разрез по региональному профилю, частично пересекающему Западно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов и Дмитровское нефтегазоконденсатное месторождение (по данным [7, 20]).

1 – скважина глубокого бурения; 2 – предполагаемые тектонические нарушения; 3 – отражающие поверхности: а – кровля пород кунгурского яруса, б – кровля подсолевых пород, в – кровля отложений бобриковского горизонта, г – кровля отложений среднего девона, д – кровля отложений нижнего девона, е – кровля ордовикских отложений, ж – кровля рифей-вендских отложений, з – кристаллический фундамент; 4 – Оренбургское (Западно-Оренбургский геодинамически активный очаг генерации углеводородов (по [20]) и Дмитровское нефтегазоконденсатное месторождение

В результате в первом приближении получили схематическую сеть разломов фундамента, отражающую радиально-концентрическое его строение и генетически связанную с современными геодинамическими процессами в земной коре (см. рис. 1). Для уточнения построений выполнили дешифрирование космического снимка, подтвердившее наличие крупной радиально-концентрической структуры $\varnothing \sim 250$ км, названной нами Оренбургской (см. рис. 1, см. рис. 2).

РАДИАЛЬНО-КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Схематическая сеть разломов фундамента юго-западной части Восточно-Европейской платформы демонстрирует наличие крупных радиально-концентрических структур, выявление которых проводилось в соответствии с контурами доминирующих дугообразных разломов и результатами

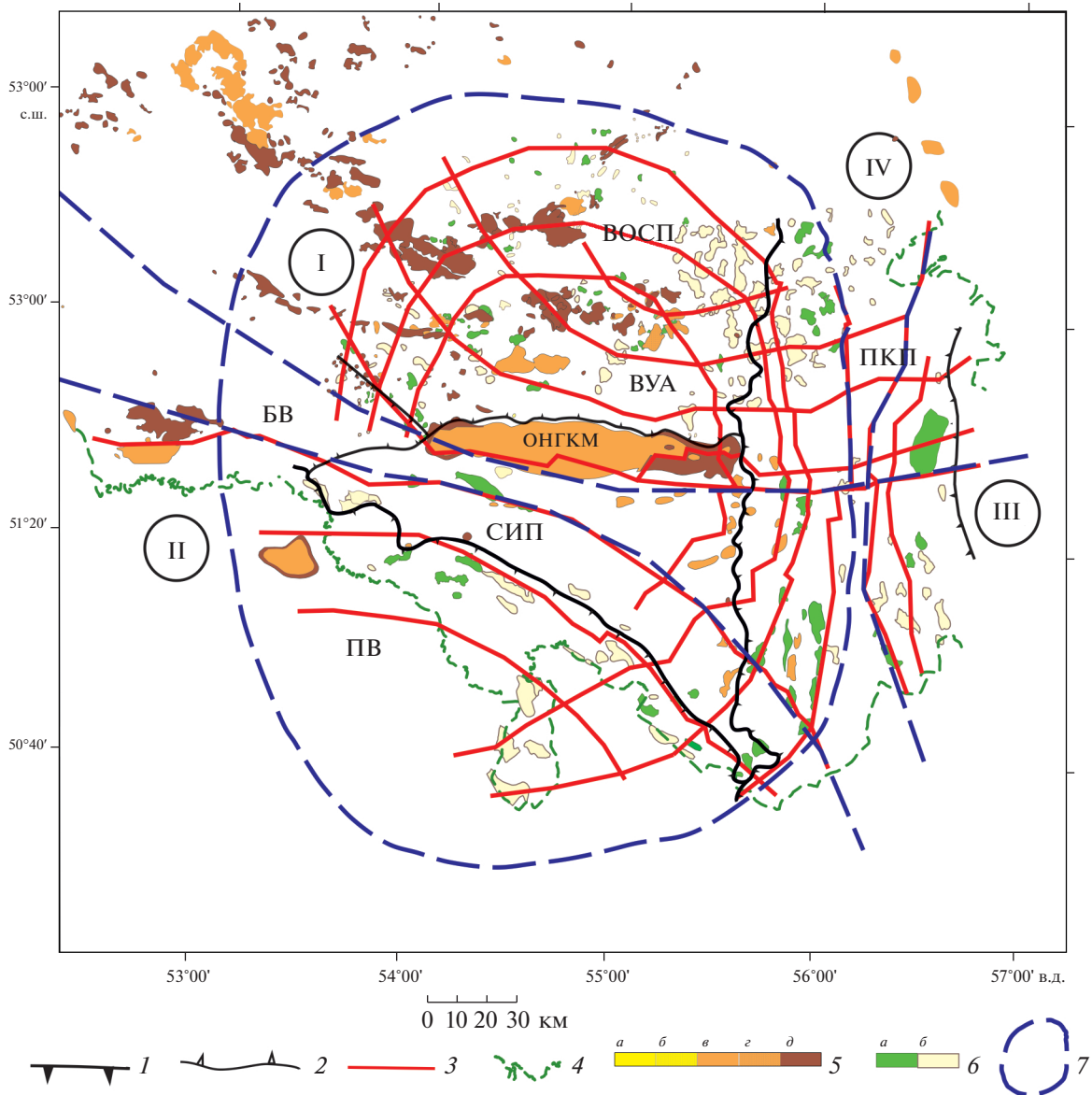


Рис. 5. Оренбургская (I), Прикаспийская (II), Предуральская (III), Оренбургско–Ромашкинская (IV) радиально-концентрические структуры фундамента Русской платформы.

Надпорядковые структуры фундамента Русской платформы: ВУА – Волго-Уральская антеклиз, ПВ – Прикаспийская впадина, ПКП – Предуральский краевой прогиб;

структуры 1-го порядка в осадочном чехле: ВОСП – Восточно-Оренбургское сводовое поднятие, БВ – Бузулукская впадина, СИП – Соль-Илецкое поднятие.

1–2 – границы структур: 1 – надпорядковых в фундаменте Русской платформы, 2 – 1-го порядка в осадочном чехле; 3 – предполагаемые разломы; 4 – регион исследования; 5 – залежи: а – газовые, б – газоконденсатные, в – газонефтяные, г – нефтегазоконденсатные; д – нефтяные; е – структуры в подсолевых отложениях: а – подготовленные к бурению, б – выявленные; 7 – радиально-концентрические структуры фундамента, их номера

дешифрирования космического снимка (см. рис. 1, рис. 5):

- Оренбургская (I);
- Прикаспийская (II);
- Предуральская (III);
- Оренбургско-Ромашкинская (IV).

Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение, более мелкие залежи углеводородов

и выявленные сейсморазведочными работами структуры Волго-Уральской антеклизы, Прикаспийской впадины и западного борта Предуральского краевого прогиба распределены внутри Оренбургской радиально-концентрической структуры-I. Прикаспийская впадина относится к одноименной радиально-концентрической структуре-II $\varnothing > 700$ км. Восточный борт Предуральского краевого прогиба приурочен к Предуральской

радиально-концентрической структуре-III $\varnothing > 250$ км (см. рис. 1, см. рис. 5).

Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение, которое расположено в центре Оренбургской радиально-концентрической структуры, вместе с другими залежами углеводородов и структурами Восточно-Оренбургского сводового поднятия и северной части Предуральяского краевого прогиба входит в область распространения радиально-концентрической структуры-IV $\varnothing > 600$ км (см. рис. 1, см. рис. 5).

Продолжая построения в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции с учетом сейсмических, эту радиально-концентрическую структуру можно назвать Оренбургско-Ромашкинской, т.к. в ее пределах простирается также и крупное нефтяное Ромашкинское месторождение данных [10, 11] (рис. 6).

В зоне пересечения радиально-концентрических структур IV и III локализуется приразломная горстовидная Ирекская нефтегазоносная структура (см. рис. 1, см. рис. 5). Перспективность участка недр Ирекский сопряжена с карбонатами башкирского возраста и нижнепермскими флишоидами. То, что территория участка имеет мелкоблоковое строение и подверглась субширотным и субмеридиональным сдвигам, доказывается сейсморазведочными и гравиразведочными работами [8].

На развитие неотектонических дислокаций в районе структуры указывают результаты газохимической съемки и обработки сейсмических профилей методом сейсмической локации нефти и газа. Выявленные геохимические аномалии сосредоточены по границам Ирекской нефтегазоносной структуры и соответствуют областям повышенной проницаемости пород, тектоническим нарушениям и предполагаемым местам скопления углеводородов. Точки, выделенные методом сейсмической локации нефти и газа, соответствуют максимальным значениям энергии колебаний и местонахождению на временном разрезе флюидонасыщенных пластов и зон повышенной трещиноватости.

Самые высокие концентрации газов, а также большая часть точек, выявленных методом сейсмической локации нефти и газа, зафиксированы в межсоловых мульдах, возле стенок и внутри соляных куполов и гряд [8].

Неотектонические сдвиговые деформации древней Восточно-Европейской платформы привели к образованию месторождений нефти и газа или перераспределению сформировавшихся залежей углеводородов в пределах радиально-концентрических структур. Влияние неотектонических процессов на локализацию месторождений углеводородов в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции доказывают геоморфологические исследования [1].

Уникальное Оренбургское нефтегазоконденсатное месторождение, которое находится в центре макроструктуры I, стало результатом функционирования очагов генерации углеводородов в фундаменте. Вдоль радиальных и концентрических разломов сосредоточены небольшие месторождения углеводородов (см. рис. 1, см. рис. 5).

Оренбургское месторождение приурочено к зоне наложения кольцевых структур I и IV, что является значимым фактором при обнаружении крупных месторождений. Выявленная сейсморазведочными работами и подготовленная к бурению Ирекская нефтегазоносная структура также простирается в зоне пересечения макроструктур (III и IV), что позволяет рассматривать ее как высокоперспективную (см. рис. 5).

РЕКОНСТРУКЦИЯ РАДИАЛЬНО-КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Анализ сейсмических данных, результатов геоморфологических исследований и закономерностей распределения месторождений нефти и газа в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции и частично в Прикаспийской впадине с применением схемы

“глубинный разлом → залежь углеводородов → соляная структура”

позволил выделить другие радиально-концентрические структуры, самые крупные из которых [1, 10, 11, 13] (см. рис. 6):

- Средневожская (V);
- Башкирская (VI);
- Свердловская (VII);
- Пермская (VIII).

Средневожская радиально-концентрическая структура-V ($\varnothing \sim 480$ км) выделена по сейсмическим и геоморфологическим данным совпадает с закартированной на территории Татарста-

на одноименной геофизической концентрически-кольцевой структурой [1, 11, 15]. В ее центре располагается крупнейшее нефтяное Ромашкинское месторождение, где широко известны факты миграции углеводородов через фундамент в осадочный чехол по разломам и зонам трещиноватости [9, 18]. Глубинные разломы структуры V, имеющие преимущественно концентрическую и радиальную направленность, разделяют кристаллическую кору региона на блоки, которые делятся на более мелкие блоки, под воздействием глубинных субширотных сдвигов [11] (см. рис. 6).

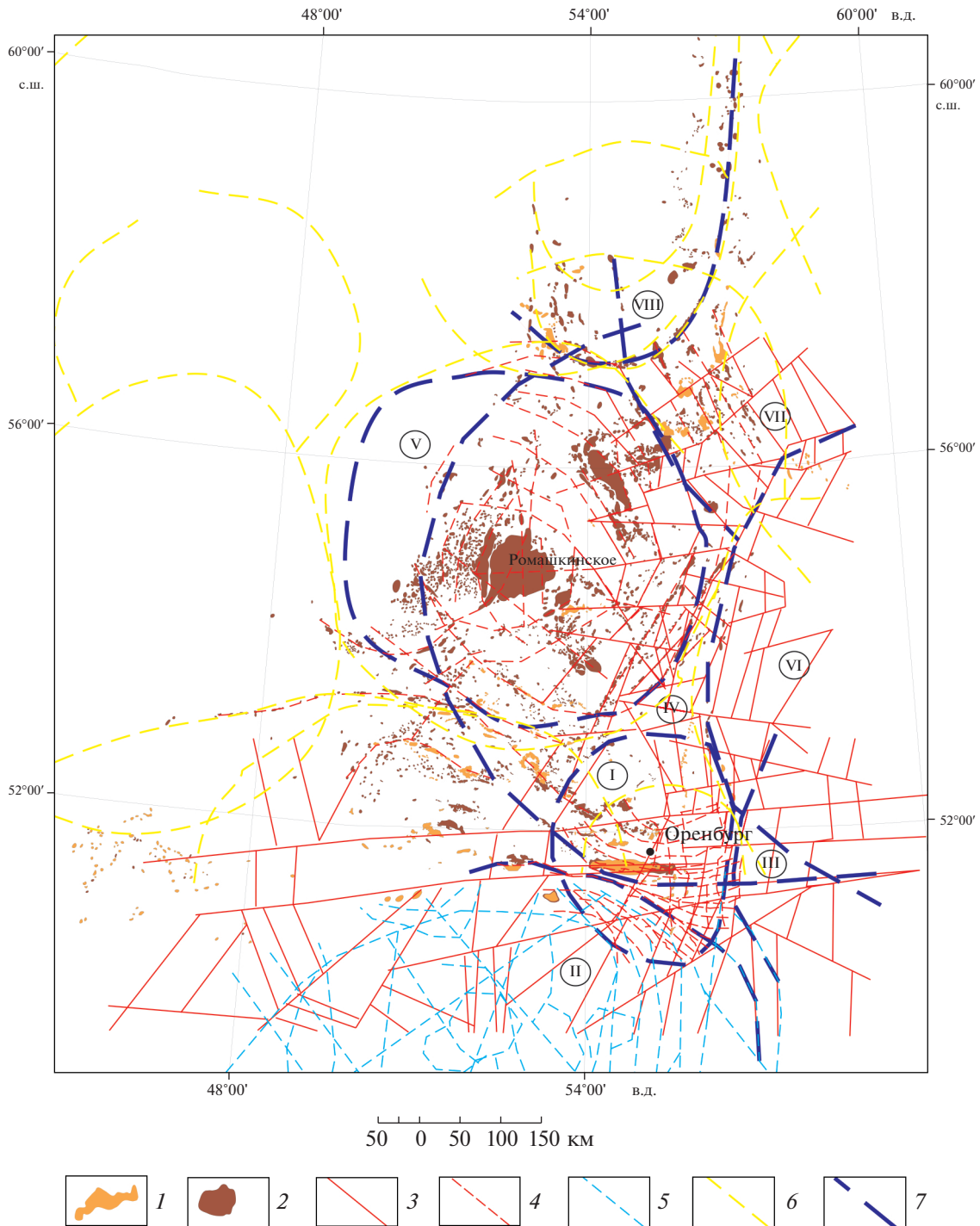


Рис. 6. Оренбургская (I), Прикаспийская (II), Предуральская (III), Оренбургско–Ромашкинская (IV), Средневожская (V), Башкирская (VI), Свердловская (VII), Пермская (VIII) радиально-концентрические структуры фундамента Русской платформы.

1–2 – месторождения: 1 – газоконденсатные, 2 – нефтяные; 3 – разломы фундамента (по данным [10, 11]); 4 – предполагаемые разломы; 5 – основные направления простираения соляных гряд и куполов (по данным [13]); 6 – изометрические структуры (по данным [1]); 7 – контуры предполагаемых радиально-концентрических структур.

Крупное Ромашкинское нефтяное месторождение является результатом работы очагов генерации углеводородов в фундаменте, которые провоцируют вертикальную и горизонтальную

миграцию углеводородов, возобновляемость запасов нефти и газа.

Вдоль радиальных и концентрических разломов, служащих путями миграции углеводородов,

сосредоточены все месторождения нефти и газа региона. Кроме того, Ромашкинское нефтяное месторождение находится в зоне наложения радиально-концентрических структур IV и V, подтверждая компетентность предложенного нами поискового признака обнаружения высокоперспективных нефтегазоносных структур.

Башкирская-VI ($\varnothing > 600$ км) и Свердловская-VII ($\varnothing > 500$ км) радиально-концентрические структуры выделены по сеймотектоническим и геоморфологическим данным, в геотектоническом плане приурочены к Предуральскому краевому прогибу [1, 11] (см. рис. 6). Их центры, как и центры макроструктур III и IV, вероятно, находятся в зоне простираания Уральской складчатой системы.

Пермская-VIII ($\sim 360 \times 600$ км) радиально-концентрическая структура не охарактеризована сеймотектоническими данными, поэтому ее выделение выполнялось по результатам геоморфологических исследований и анализа закономерностей распределения месторождений нефти и газа [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ

По сейсмическим, геоморфологическим данным и структурным построениям в пределах древней Восточно-Европейской платформы нами было выявлено и изучено восемь крупных радиально-концентрических структур, которые являются результатом проявления глубинных разломов фундамента в осадочном чехле и имеют неотектоническую природу.

“глубинный разлом → залежь углеводородов → соляная структура”,

а также сеймотектонические, геоморфологические и данные о развитии неотектонических дислокаций в регионе исследования.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На протяжении 2009–2014 гг. на юго-западе Оренбургской области проводился мониторинг современных геотектонических процессов (55 случаев сейсмических событий) указывает на то, что сейсмическая активность Соль-Илецкого свода не прекратилась до нашего времени, хотя и частично связана с интенсивной разработкой Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения [19]. Большая часть эпицентров сейсмических событий зарегистрирована в центре Оренбургской радиально-концентрической структуры, а также в зонах пересечения радиальных и концентрических (см. рис. 1).

В зонах распространения Восточно-Оренбургского и Западно-Оренбургского геодинамически активных очагов генерации углеводородов [20]

Очаги генерации углеводородов, вероятно, находятся в середине выявленных макроструктур и представляют собой сеть глубинных разломов фундамента, имеющих современную геодинамическую активность. На временных сейсмических разрезах их характеризует хаотическая субвертикально направленная локально усиленная сейсмическая запись в породах фундамента Восточно-Европейской платформы, распространяющаяся на значительную глубину. Радиально-концентрические структуры представляют собой центры аккумуляции углеводородов. Вдоль радиальных и концентрических разломов, являющихся путями миграции углеводородов, располагаются залежи нефти и газа.

На юго-западе Оренбургской области России на временных сейсмических разрезах месторождения углеводородов представлены неотектоническими структурами “цветкового” типа, над которыми соли кунгурского яруса нижней перми образуют купола. По разветвленной сети наклонных глубинных разломов фундамента и разнонаправленным неотектоническим оперяющим нарушениям возможно поступление порций углеводородов в залежи.

При реконструкции радиально-концентрических структур и картировании очагов генерации углеводородов в фундаменте древних платформ, характеризующихся значительными глубинами залегания фундамента и наличием мощного осадочного чехла, используется схема

случаев сейсмических событий зарегистрировано меньше, что может говорить о том, что они не являются основными или единственными.

Результаты дешифрирования космических снимков в пределах Оренбургского вала, Соль-Илецкого поднятия и Предуральского краевого прогиба [3] подтверждают радиально-концентрическое строение фундамента оренбургской части Восточно-Европейской платформы. Здесь выявлено несколько кольцевых и радиально-концентрических структур $\varnothing 10\text{--}75$ км (см. рис. 1, см. рис. 2).

Наиболее крупная ($\varnothing 75$ км) простирается в районе Восточно-Оренбургского геодинамически активного очага генерации углеводородов, включая в себя Красноярское, Комаровское, Черниговское, Чкаловское, Южно-Оренбургское месторождения нефти и газа и восточный купол Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения (см. рис. 1, см. рис. 2). И еще одна крупная радиально-концентрическая структура ($\varnothing 80$ км), выявленная нами в результате дешиф-

рирования космического снимка в пределах Оренбургской макроструктуры-I, находится на Восточно-Оренбургском сводовом поднятии. Дачно-Репинское, Донецко-Сыртовское, Царичаноское и другие месторождения нефти сосредоточены вдоль ее концентрических разломов (см. рис. 1, см. рис. 2).

В 1983 г. в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции методом дешифрирования космоснимков было выявлено более 100 изометричных объектов, из них [3]:

– 20 изометричных объектов находят отображение в строении фундамента и платформенного осадочного чехла;

– 10 изометричных объектов пространственно соответствуют месторождениям нефти и газа – Ромашкинскому, Шарлыкскому и др.

Наши построения подтверждают, что Прикаспийская впадина представляет собой гигантскую кольцевую структуру, имеющую до 1000 км в поперечнике [3].

Основные протрассированные направления простирания соляных гряд и куполов, по данным, а также выявленные в результате сейсмогеоплотностного моделирования глубинные разломы, указывают на радиально-концентрическое строение ее фундамента и высокие перспективы, в том числе и на юго-западе Оренбургской области [10, 13] (см. рис. 6).

Таким образом, в пределах выявленных нами радиально-концентрических структур Восточно-Европейской платформы в зонах развития трещинных коллекторов, перекрытых надежными флюидоупорами на востоке Башкортостана и Оренбургской области, в западных частях Свердловской, Челябинской областей, в Кировской, Пермской и других областях, могут быть обнаружены новые месторождения нефти и газа.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. По совокупности структурных построений нами были выделены четыре крупные радиально-концентрические структуры I–IV, контролирующее расположение месторождений углеводородов и выявленных сейсморазведочными работами структур на территории юго-запада Оренбургской области. Построения подтверждают результаты мониторинга современных геотектонических процессов и дешифрирования космических снимков.

2. Предположено, что центры структур являются очагами генерации углеводородов и имеют геодинамическую активность, при этом путь миграции углеводородов происходит через зоны радиальных и концентрических разломов.

3. Выделены еще четыре крупные радиально-концентрические структуры V–VIII Восточно-Европейской платформы, в пределах которых возможны поисково-разведочные работы на нефть и газ.

4. Разработана методика выявления очагов генерации углеводородов в пределах древних платформ.

Благодарности. Автор выражает благодарность ООО “Газпром-добыча Оренбург” (г. Оренбург, Россия) за предоставленные материалы. Автор признателен анонимным рецензентам за конструктивные комментарии и редактору за тщательное редактирование.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках тем № 1021052504590-8-1.5.4 государственного задания ИГ УрО РАН и № АААА-А19-119072990020-6 государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агibalов А.О., Зайцев В.А., Мануилова Е.А., Мошкин И.В., Сенцов А.А.* О влиянии неотектонических движений на особенности локализации месторождений нефти и газа Волго-Уральской антеклизы // Электронный научно-образовательный журнал “Динамическая геология”. 2020. № 2. С. 125–137.
2. *Баренбаум А.А.* Новые представления о происхождении нефти и газа в связи с открытием явления пополнения запасов эксплуатируемых месторождений // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 4. С. 34–39.
3. *Волчкова Г.И., Лукина Н.В., Макаров В.И. и др.* Космическая информация в геологии. – М.: Наука, 1983. 534 с.
4. *Гаврилов В.П.* Механизмы естественного восполнения запасов на нефтяных и газовых месторождениях // Геология нефти и газа. 2008. № 1. С. 57–65.
5. *Горожанина Е.Н., Горожанин В.М., Ефимов А.Г., Побережский С.М., Светлакова А.Н.* Геологическое строение западной части Предуральского прогиба на территории Оренбургской области и структурная позиция нефтегазоносных комплексов. – Уфа: Дизайн Полиграф Сервис, 2008. Геологический сборник № 8. С. 221–226.
6. *Данилова Е.А.* Присдвиговые цветковые структуры юго-запада Оренбургской области // Региональная геология и металлогения. 2020. Т. 82. С. 60–68.
7. *Данилова Е.А.* Соляные структуры осадочного чехла Русской платформы как отражение возможных геодинамически активных очагов генерации углеводородов в фундаменте (на примере Оренбургской области) // Геология и геофизика юга России. 2021. Т. 11. № 3. С. 33–44.
8. *Данилова Е.А.* Перспективы нефтегазоносности приразломных зон трещиноватости Оренбургского Приуралья. – Автореф... дис. к.г.-м.н. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2021), 25 с.
9. *Драгунов А.А., Мухамадиев Р.С., Чернов С.В.* Влияние геодинамических процессов на фильтрационно-емкостные свойства геологической среды (на примере Ромашкинского месторождения) // Георесурсы. 2017. № 4. С. 319–322.

10. Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. Сейсмогеоплотностное моделирование — основа для тектонического районирования кристаллической коры Прикаспийской впадины и окружающих структур // Уральский геофизический вестник. 2019. Т. 38. № 4. С. 21–34.
11. Дружинин В.С., Начапкин Н.И., Осипов В.Ю. Стрoение и нефтегазоносность додевонского мегакомплекса юго-восточной окраины Восточно-Европейской платформы // Уральский геофизический вестник. 2021. Т.43. № 1. С. 12–19.
12. Иванова Н.А., Сафонов А.О. Особенности строения галогенных толщ зоны сочленения Прикаспийской впадины и Волго-Уральской антеклизы на территории Оренбуржья // Недра Поволжья и Прикаспия. 2010. № 61. С. 33–41.
13. Исказиев К.О. Проблемы доразведки надсолевых отложений центральной части Прикаспийской впадины // Oil&Gas Journal Russia. 2018. № 8(128). С. 42–47.
14. Кучеров В.Г., Иванов К.С., Серовайский А.Ю. Глубинный цикл углеводородов // Литосфера. 2021. Том 21. № 3. С. 289–305.
15. Лозин Е.В. Глубинное строение и нефтегазоносность Волго-Уральской области и смежных территорий // Литосфера. 2002. № 3. С. 45–68.
16. Лукьянов В.Ф. Радиально-концентрические структуры в восточной части Воронежского кристаллического массива (ВКМ). — Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2000. Вып. 9. С. 31–37.
17. Муравьев В.В. Геодинамика и нефтегазоносность систем концентрических дислокаций литосферы. — В кн.: Условия образования и закономерности размещения залежей нефти и газа. — Киев: Наукова Думка, 1983. С. 121–127.
18. Муслимов Р.Х., Плотникова И.Н. Пора приступать к моделированию процессов воспроизводства запасов углеводородов на длительно эксплуатируемых месторождениях. — В сб.: Моделирование геологического строения и процессов разработки — основа успешного освоения нефтегазовых месторождений. — Мат-лы Междунар. научн.-практ. конф. 4–5 сентября 2018 г., Казань, Академия наук РТ. — Казань: Слово, 2018. С. 292–294.
19. Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М., Соколов А.Г. Геодинамические процессы в разрабатываемых месторождениях углеводородов (на примере Южного Предуралья). — Екатеринбург: УрО РАН, 2015. 186 с.
20. Самарцев С.К., Данилова Е.А., Драгунов А.А., Драгунов В.А. Геодинамически активные очаги генерации углеводородов как возможные источники восполнения залежей Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Бурение и нефть. 2021. № 4. С. 10–13.
21. Смирнова М.Н. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 1–6.
22. Соколов А.Г. Выделение и трассирование тектонических нарушений по данным сейсморазведки и прогнозирование приразломных ловушек в платформенном Оренбуржье. — Оренбург: ОГУ, 2010. 205 с.
23. Харченко В.М. Природа структур центрального типа и закономерности распространения залежей углеводородов, локальных и региональных очагов землетрясений. — Вестн. Северо-Кавказского техн. ун-та. 2006. Т. 6. № 2. С. 48–53.
24. McKirdy D.M. Hydrocarbon generation and migration. — In: *The Petroleum Geology of South Australia*. — Vol. 2: *Eromanga Basin*. — Ed. by T.B. Cotton, M.F. Scardigno, J.E. Hibburt. — (Dprtm. Primary Industr. Res., Adelaide, South Australia, 2006. 2nd edn. Vol. 2. Ch.10), P. 2–9.
25. Davison I., Barreto P. Exhumed portuguese oil field suggests conjugate potential // GEOExPro. 2019. P. 38–40.
26. Grillo J.C. Tectonics of Late and Post-Hercynian ages in the western of the Iberian Plate (Portugal) // Comptesrendus de l'académie des sciences. 1984. Vol. 299. P. 665–670.
27. Mann P., Gahagan L., and Gordon M.B. Tectonic setting the world's giant oil and gas fields. — In: *Giant oil and gas fields of the Decade 1990–1999*, Ed. by M.T. Halbouty, (Mem. AAPG. 2003. Vol. 78), P. 15–105.
28. Naumann S., Sakariassen R. Diving deeper to reveal hydrocarbon potential in the Barents sea // GEOExPro. 2019 (June). P. 20–24.
29. Saadallah A. A proposed new tectonic model for the Northern Algerian Alpine Region based on studies of the Internal Zone rejects the previous model and suggests ideas for new hydrocarbon traps and prospects // GEOExPro. 2019 (June). P. 14–18.
30. <https://yandex.ru/maps/geo/orenburg/53105182/?l=sat&ll=56.261353%2C51.629121&z=7> (Accessed March 30, 2022)

Radial-Concentric Structures in the Basement of an Ancient Platform and Conditions for the Occurrence of Hydrocarbon Generation Centers: Reconstruction from Seismotectonic Data

E. A. Danilova^{a, b, *}

^a*Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
bld.100, st. Amundsen, 620016 Yekaterinburg, Russia*

^b*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
bld.15, st. Academician Vonsovsky, 620016 Yekaterinburg, Russia*

*e-mail: yevgeniya.antoninovna@bk.ru

The article offers updated methods for identifying radial-concentric structures of the foundation of the East European Platform as potential sources of hydrocarbon generation. On the example of the south-west of the

Orenburg region, seismogeological signs and tectonic conditions of their occurrence and distribution have been studied. When identifying the foci of hydrocarbon generation, the following were used: updated interpretation of regional seismic profiles using the method of successive approximations and detailing, the results of the analysis of geological and geophysical and remote works. It has been established that in the areas of distribution of geodynamically active foci of hydrocarbon generation in the sedimentary cover, structures of the “flower” type are present on the time sections of seismic profiles. Above the accumulations of hydrocarbons, the salts of the Kungursky tier of the lower Perm form large domes (the area of the East Orenburg geodynamically active hearth, the deposits of the Pre-Ural regional trough and its junction zone with the East European Platform) or only rise within the blocks limited by tectonic disturbances (the area of the West Orenburg geodynamically active hearth, the deposits of the Salt-Iletsk arch). Below the roof of the Devonian deposits in the zones of the strike of hydrocarbon deposits, there is a chaotic subvertically directed locally enhanced seismic record extending deeper than the reflecting horizon identified with the roof of the foundation rocks. According to the structural constructions, taking into account the configuration of hydrocarbon deposits, a schematic network of foundation faults was obtained, genetically related to the latest tectonic shifts. Deposits and structures identified by seismic surveys have a regular distribution within four large radial-concentric structures. The constructions are confirmed by the results of monitoring modern geotectonic processes and decoding satellite images. We assume that the centers of the structures are foci of hydrocarbon generation, have geodynamic activity, while the migration of hydrocarbons occurs along the zones of radial and concentric faults. By analogy with the Orenburg tectonic node, several other large centers of hydrocarbon accumulation have been identified, within which it is advisable to continue prospecting and exploration for oil and gas.

Keywords: ancient platform, hydrocarbon generation centers, radial-concentric structures, reinterpretation of temporary seismic sections, foundation, sedimentary cover, neotectonic shear deformations, salt structures, oil and gas deposits

УДК 550.34

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ (УЗБЕКИСТАН): МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2022 г. И. У. Атабеков¹, *, Ю. М. Садыков¹

¹Институт сейсмологии им. Г. Мавлянова, Академия наук Республики Узбекистан,
д. 3 ул. Зулфияханум, 100028 Ташкент, Узбекистан

*e-mail: atabekovi@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2022 г.

После доработки 26.03.2022 г.

Принята к публикации 11.05.2022 г.

Анализ сейсмических и тектонических процессов с учетом размеров тектонических структур, определяющих особенности взаимосвязи между тектоническими единицами разного ранга, позволяют выявлять закономерности развития сейсмического процесса для прогноза сейсмической активизации. Современные тектонические движения отражают складчато-глыбовый характер строения земной коры. В нашем исследовании на основе уравнений Стокса решается задача о напряженном состоянии земной коры региона Западного Тянь-Шаня с учетом активных разломов разного ранга. Группировка направления скоростей перемещения, полученных в результате численного решения, позволила разделить регион Западного Тянь-Шаня на отдельные блоки, границы которых практически совпадают с существующими разломами более высокого ранга. Численные результаты модели верифицируются с геодезическими данными и данными GPS. Наиболее напряженные участки региона Западного Тянь-Шаня сопоставляются с данными макросейсмических исследований.

Ключевые слова: неотектоника, современные тектонические движения, численная модель, напряжение земной коры, Ферганская впадина, Западный Тянь-Шань

DOI: 10.31857/S0016853X22030031

ВВЕДЕНИЕ

Территория Узбекистана характеризуется сложным тектоническим строением и высоким уровнем сейсмической активности. Только за последние 150 лет здесь произошло более 70-ти землетрясений с магнитудой $M > 5.0$, которые нанесли огромный ущерб экономике республики и унесли жизни сотен людей. Поэтому, проблема обеспечения сейсмической безопасности населения, объектов промышленного и гражданского строительства для исследуемой территории актуальна.

Сильные землетрясения происходят неравномерно во времени и пространстве. По времени они сгруппированы в периоды сейсмических активизаций и затиший, в пространстве – локализованы в пределах достаточно компактных областей, расположенных внутри крупных сейсмоактивных зон. Изучение природы сейсмических явлений и прогнозирование на их основе реальной сейсмической опасности конкретных территорий должно базироваться на исследованиях силовой картины сейсмоактивных структур, формирующей современное напряженное состояние

массива горных пород и оценках степени его близости к моменту крупномасштабного разрушения.

Важную информацию о кинематике разрывов в очагах происходящих землетрясений и современном напряженном состоянии массивов горных пород несут сведения о механизмах очагов землетрясений. Другой, не менее важной задачей является построение механико-математической модели напряженно-деформированного состояния сейсмоактивных структур в результате происходящих геодинамических процессов.

Несмотря на наличия оценок геодинамической обстановки различных регионов на основе экспериментальных данных и механизмов землетрясений для Центральной Азии [29–33], отсутствуют математические модели для расчета напряжений, учитывающие уравнения равновесия сплошных сред. Была предпринята попытка построения такой модели с учетом механизма землетрясений, исходя из предположения, что деформация земной коры Центральной Азии подвержена латеральному сжатию Индийской и Арабской плит с одной стороны и Евразийской плиты с другой стороны [1, 23]. Модельные на-

пряжения, деформации и скорости перемещений вычисляются решением обратных задач упругости. Результаты численной модели верифицированы с имеющимися оценками напряжений и данными GPS [7, 12–14, 33].

Данные, полученные на основе дислокационной модели механизма очага землетрясений, использованы для расчета изменения напряженного состояния земной коры Центральной Азии вследствие сильных землетрясений и сопоставлены с экспериментальными данными [2, 23]. Они также использованы в качестве исходных данных для решения задачи сеймотектонического течения горных масс Центральной Азии посредством уравнений Стокса [1]. Однако, в той постановке моделирования Ферганская депрессия выражена как единый блок и не принимались в расчет существующие активные разломы [1, 23]. Решение задачи с их учетом позволяет сделать более информативной трактовку процессов, связанных с напряженным состоянием земной коры.

Целью нашей статьи является решение задачи напряженного состояния земной коры региона Западного Тянь-Шаня, с учетом активных разломов первого ранга на основе уравнений Стокса. Авторами предварительно построена карта амплитуд новейших тектонических движений, на основе всех имеющихся данных для Ферганской впадины, построена математическая модель напряжений на основе уравнений Стокса, с учетом активных разломов рассматриваемого региона. Результаты модели сопоставлены с данными построенной карты и результатами макросейсмической дислокации.

РАЗНОРАНГОВЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

В тектонических структурах Западного Тянь-Шаня наблюдается высокая степень унаследованности современных движений. Большинство современных структур Тянь-Шаня изучены советскими специалистами, немногочисленные исследования, касающиеся территории Кыргызстана и Таджикистана, проведены также и зарубежными специалистами [24, 25, 27, 28, 31]. Для анализа новейших тектонических движений Ферганской впадины составлена карта амплитуд новейших тектонических движений с выделением разломов различного ранга [19] (рис. 1, рис. 2).

При составлении карты мы использовали данные, которые сыграли заметную роль в развитии неотектонических исследований территории Узбекистана [9, 11]. На составленной нами карте получили свое четкое выражение подвижные и устойчивые участки, а в их пределах – отдельные структурные формы (морфоструктуры) (см. рис. 1). Отображая суммарную величину поднятий и

опусканий исходной поверхности, изолинии на карте очерчивают форму новейшей структуры (см. рис. 1).

За репер неотектонических движений принята стратиграфическая кровля верхнего эоцена [15]. Она фиксирует повсеместно палеогеографическую смену условий осадконакопления с морских (монотонная толща зеленых глин) на континентальные (песчано-глинистые и пестроцветные осадки) отложения. В неотектонических прогибах Западного Тянь-Шаня в общей толще эоцен–олигоценовых глинистых отложений этот рубеж выявляется по слабому погрублению, известковости олигоценовой части разреза и насыщенности его смешанным комплексом фораминифер. Отображенные на карте суммарные деформации являются проекцией на горизонтальную плоскость суммы вертикальных и горизонтальных перемещений.

При условии, если Западный Тянь-Шань принять за неотектоническую структуру 1-го ранга, то выделяемые на карте следующие неотектонические блоки образуют структуры 2-го ранга: Чаткало-Кураминский, Ташкентско-Голодностепский, Ферганский, Таласо-Ферганский и Южно-Тянь-Шаньский блоки, которые отличаются амплитудами неотектонических движений, ориентацией и морфологией разрывных нарушений.

В пределах блоков 2-го ранга выделяются соответствующие неотектонические блоки 3-го ранга. Одним из определяющих факторов современной структуры Западного Тянь-Шаня являются активные разрывные нарушения. Большинство сильных и катастрофических землетрясений связано с разломами земной коры. Современная сейсмическая активность разрывных нарушений характеризуется комплексом геолого-геофизических параметров, удостоверяющих их тектоническую активность в четвертичный, новейший и современный этапы развития. К настоящему времени в зависимости от конечной цели, разработаны различная классификация разрывных нарушений [21].

В неотектонике используется классификация разломов, учитывающая геометрические, морфологические и пространственные характеристики. К важным параметрам разломов также относятся генезис, возраст заложения, амплитуда смещений (до-орогенных, орогенных, новейших, четвертичных и современных), отношение к тектоническим структурам, проявленная сейсмичность (включая палеосейсмодислокации), данные геофизики, геохимии, геодезии, аэрофото- и космической съемки. На основании этих параметров разломы разделены на 1–3 ранги.

В данной схеме в первую очередь выделяется пространственная ориентировка разломов и их положение относительно новейших (современных) тектонических блоков. Как показал анализ

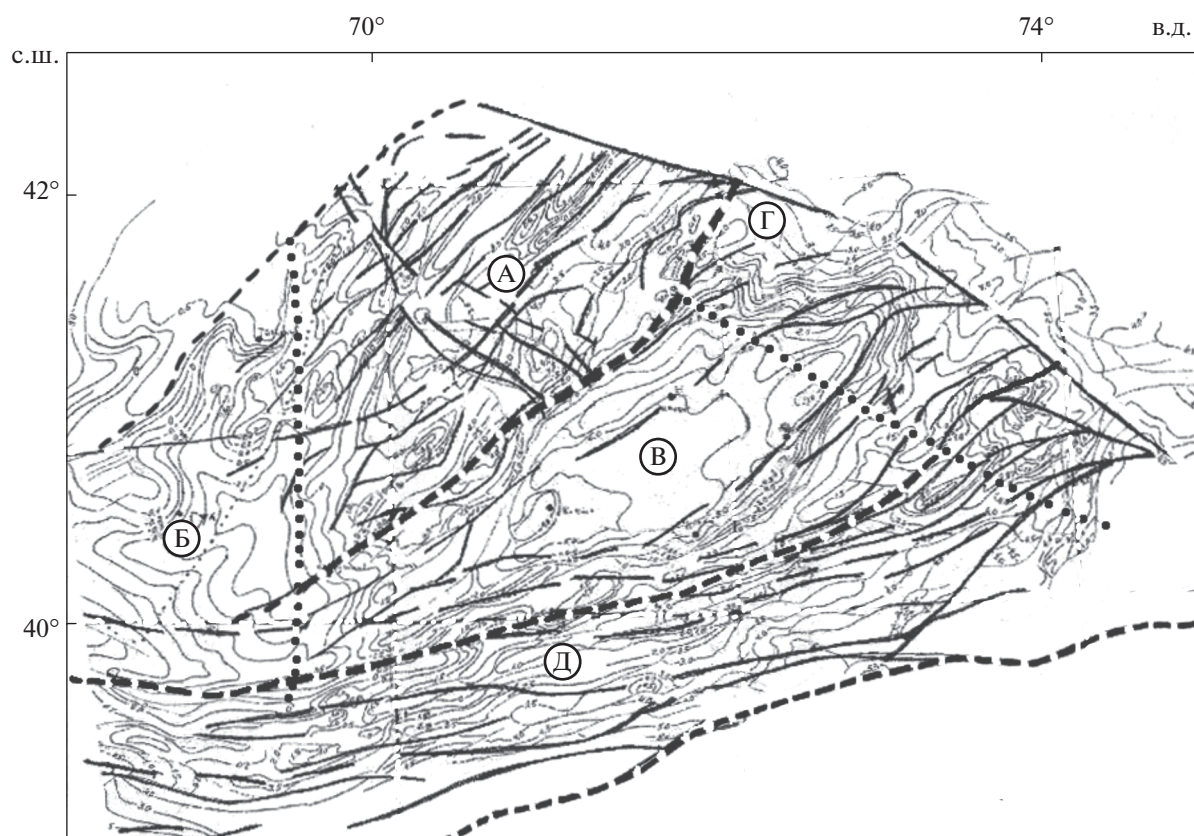


Рис. 1. Карта амплитуд новейших тектонических движений Западного Тянь-Шаня (по данным [4], оригинальное воспроизведение основы, с дополнениями).

Блоки: А – Чаткало-Кураминский; Б – Ташкентско-Голодностепский; В – Ферганский; Г – Таласо-Ферганский; Д – Южно-Тянь-Шаньский.

1 – амплитуда новейших тектонических движений; 2 – неотектонические блоки 2-го ранга; 3 – границы неотектонических блоков: а – первого ранга, б – второго ранга; с – выделенные по амплитудным характеристикам, 4 – внутри-блочные разломы

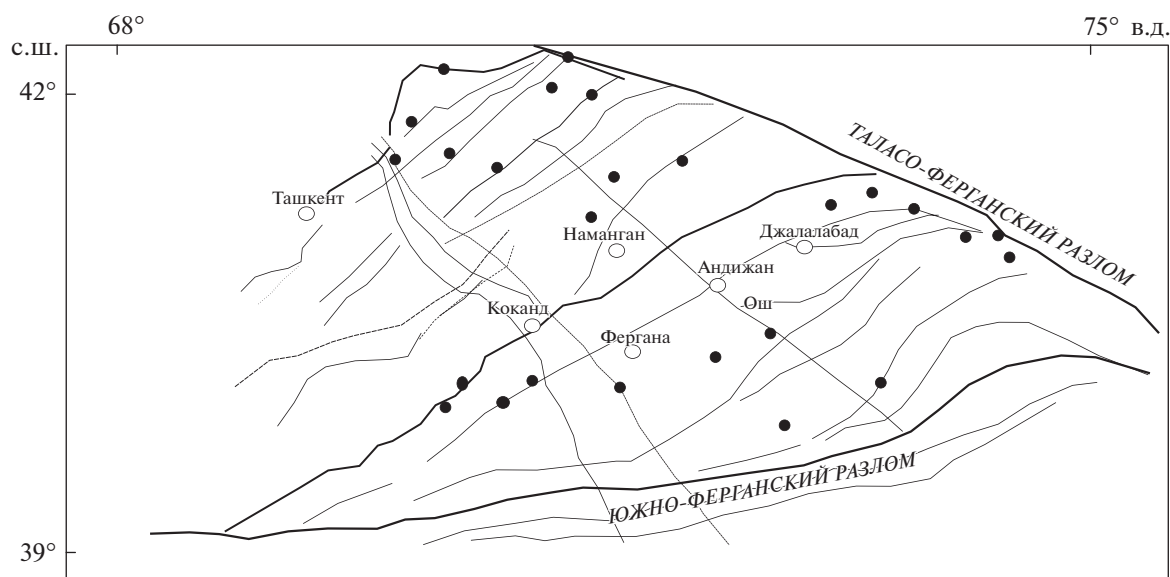


Рис. 2. Активные разломы Западного Тянь-Шаня (по данным [4], с изменениями и дополнениями).

Обозначены разломы: краевые (жирные линии); внутренние (тонкие линии); города Ферганской впадины и ее окрестности (кружки белым); пункты наблюдений GPS (по [16]) (кружки черным).

сети разломов, развитых в пределах Западного Тянь-Шаня, глубинные характеристики, морфология и другие параметры со временем могут меняться. Несущественно меняется только их простираемость, что дало возможность предположить, что сеть разломов заложена в период раннего протерозоя [21].

В пределах Западного Тянь-Шаня активность проявляют в основном три направления:

- северо-восточное (поперечно Тянь-Шаньское);
- северо-западное (Каратауское);
- субширотное (Тянь-Шаньское).

Указанные направления, преимущественно, контролируют новейший структурный план региона и отвечают основным параметрам современной геодинамики. В пространственном положении эти разломы подразделяются на:

- краевые (структуры 1-го, 2-го и 3-го рангов);
- внутренние.

Краевые разломы, являясь структурно-контролирующими структурами и разграничивая разнонаправленно развивающиеся тектонические блоки (антиклинальные и синклиналильные), обладают повышенным сейсмотектоническим потенциалом (см. рис. 2). Сравнительно меньшей сейсмичностью и частотой проявления сильных землетрясений характеризуются внутренние разломы, определяющие дифференцированный характер движений внутри тектонических блоков. Особое положение занимают флексурно-разрывные зоны, – располагаясь в теле крупных впадин и прогибов, они представляют собой сложное сочетание изгибов и разрывных дислокаций. Во флексурно-разрывных зонах возникали разрушительные землетрясения.

Краевые разломы

Таласо-Ферганский правосторонний сбросо-сдвиг (структура 1-го ранга). Таласо-Ферганский разлом разграничивает области Западного и Центрального Тянь-Шаня, которые имеют различные новейший и современный геодинамический режимы. Данный разлом протягивается вдоль Ферганского, Атойнокского и Таласского поднятий.

Параллельно линии Ферганского разлома прослеживаются многочисленные разрывы, при ширине до 1–3 км вырезающие длинные узкие тектонические линзы до десятков километров. Ширина зоны сбросо-сдвига колеблется от 8–10 км до 15 км. Характерна локализация поднятий Чаткало-Кураминской зоны в регионе динамического воздействия Таласо-Ферганского сдвига. Сдвиговые смещения молодых форм рельефа обнаруживаются на всем протяжении разлома. Скорость смещения по сдвигу составляют [6]:

- ≤ 2 мм/год (наши дни);
- 12 мм/год (голоцен);
- 12–20 мм/год (поздний кайнозой).

С активностью данного разлома связывается возникновение Чаткальского землетрясения 1946 г. и обнаруженные здесь палеосейсмодислокации Талас и Каракульджа с предельной магнитудой землетрясений $M \leq 7.5$ [9].

Аксу-Майдантальско-Богоналинская система разломов (структура 2-го ранга). Аксу-Майдантальский и Богоналинский разломы ограничивают Чаткало-Кураминский регион с запада. Кураминская часть региона выделена как граничный участок, окаймляющий Чаткальскую зону герцинид, северо-восточное окончание которой сливается с Таласо-Ферганским сдвигом. Юго-западное окончание Таласо-Ферганского сдвига сочленяется с Богоналинским разломом, отсекающим среднюю и южную части Каржантауского поднятия от Келесского прогиба. Зона разлома представлена в виде серии крутопадающих взбросов (45° – 75°) на юго-восток [9].

Богоналинский разлом выражен серией субпараллельных разрывов, по которым пермские отложения Каржантауского поднятия контактируют с мел-палеогеновыми и неоген-четвертичными отложениями Келесского прогиба. Падение разлома на юго-восток фиксируется под углом 60° – 70° . Система Аксу-Майдантал-Богоналинского разломов нами принимается как западная граница Чаткало-Кураминского района, которая, посредством Ташкентско-Голодностепского предорогового прогиба, сочленяется с Туранской платформой. В отличие от Северо-Ферганского краевого разлома данная система разломов менее контрастна и соответствует Западно-Тянь-Шанскому морфоструктурному линеamentу [22]. Отрезками данная система четко дешифрируется на топографических картах и аэрокосмических съемках, разделяя разнонаправленно развивающиеся неотектонические районы (см. рис. 2).

Северо-Ферганский разлом (структура 2-го ранга). Северо-Ферганский разлом является тектонической границей между Чаткало-Кураминским и Ферганским блоками. Зона разлома имеет сложное строение и состоит из многочисленных, кулисообразно расположенных разрывов, между которыми заключены брахиантиклинальные складки длиной до 30–40 км и шириной до 10 км [8].

Разлом отчетливо фиксируется аэрокосмической съемкой. Амплитуда неоген-четвертичных движений в юго-западной части достигает 4.5 км, увеличиваясь в северо-восточном направлении и достигая 6 км в средней части разлома. Вдоль разлома происходит надвигание домезозойских отложений на кайнозойское выполнение Ферганской впадины. Средний наклон смесителя составляет $\angle 45^\circ$ – 50° . По некоторым признакам

вдоль разлома происходили горизонтальные подвижки по типу левого сдвига [8].

В зоне разлома отмечаются высокие значения градиента теплового потока [18]. Средние значения современных вертикальных движений достигают 5 мм/год. С данным разломом связаны очаги 7–8 балльных землетрясений [9].

Южно-Ферганский разлом (структура 2-го ранга). Южно-Ферганский разлом является северной границей Южно-Тянь-Шаньского блока и прослеживается в виде серии параллельных нарушений. Интенсивность вертикальных движений в неотектоническом этапе была высокой. В верхнеплиоцен–четвертичное время отдельные прилегающие участки Южно-Тянь-Шаньского блока были приподняты по разлому на высоту 2000–2200 метра. Размах смещений в нижнечетвертичное время в зоне разлома было не менее 2500 метра, надвигание палеозойских пород на четвертичные отложения в средней части разлома происходило с амплитудой до нескольких сотен метров.

Новейшие подвижки по разлому проявились не повсеместно. Отдельные участки восточной части разлома накрыты мезо–кайнозойскими отложениями. По этой причине, данная часть разлома не подлежит визуальному обследованию. Морфологически разлом представляет собой крутой взброс, плоскость которого падает на юг под углом $\angle 60^{\circ}$ – 75° , местами падение смесителя практически вертикальна. В зоне возникло несколько землетрясений интенсивностью 7–8 баллов [9].

Гиссаро-Кокшаальский краевой разлом (структура 2-го ранга). Данный разлом является южной границей Южно-Тянь-Шаньского блока. Разлом функционировал в течение всего фанерозоя. Активность разлома в орогенический этап предопределила ассиметричное строение Предгиссарской впадины. Северное крыло впадины, прилегающее к зоне разлома, характеризуется крутыми углами падения. Амплитуда новейших вертикальных тектонических движений по разлому зависит от величины поднятия отдельных блоков Гиссаро-Алая и достигает 3–4 км и более. На всем протяжении с Запада на Восток разлом представлен серией крутых $\angle 50^{\circ}$ – 80° взбросов, смесители которых падают на север, магнитуда максимально возможного землетрясения здесь предполагается $M \leq 8$ [3].

Флексурно-разрывные зоны

Северо-Ферганская флексурно-разрывная зона. Северо-Ферганская флексурно-разрывная зона ограничивает центральный грабен Ферганской впадины от Северо-Ферганской зоны локальных складок, развитых между Северо-Ферганским

разломом и одноименной Северо-Ферганской разрывной зоной. Морфологические особенности изучены сейсморазведкой (“бухарские” слои верхнего палеоцена). Установлено, что Северо-Ферганская флексурно-разрывная зона представлена полосой моноклиального ($\angle 14^{\circ}$ – 22°) погружения кровли “бухарских” слоев верхнего палеоцена [15]. Амплитуда смещения в западной части достигает 600 м и увеличивается до 2000 м в окрестностях г. Наманган [9] (см. рис. 1). Восточное окончание флексурно-разрывной зоны подворачивается и сочленяется с Таласо-Ферганским сдвигом. В данной зоне возникали разрушительные землетрясения [9]:

- 1494 г. ($M = 5.1$, $H = 2$ –18 км);
- 1620 г. ($M = 6.0$, $H = 2$ –18 км);
- 1894 г. ($M = 5.8$, $H = 10$ –40 км);
- 1927 г. ($M = 4.8$, $H = 6$ –14 км);
- 1942 г. – Яртепинское ($M = 5.9$, $H = 17$ –25);
- 1967 г. – Супетауское ($M = 4.6$, $H = 6$ км);
- 1984 г. – Папское ($M = 5.7$, $H = 15$ км);
- 1985 г. – Кайраккумское ($M = 6.0$, $H = 13$ км).

Южно-Ферганская флексурно-разрывная зона.

Данная зона расположена вдоль северной границы Южно-Ферганской зоны складок. Южно-Ферганская зона складок расположена между Южно-Ферганской флексурно-разрывной зоной и одноименным Южно-Ферганским разломом. Флексурно-разрывная зона имеет форму дуги, изогнутая часть которой направлена к югу. Ширина флексурно-разрывной зоны меняется в пределах 5–10 км, достигая 20 км [9].

По кровле отражающего горизонта “бухарских” известняков палеогена для флексурно-разрывной зоны характерно резкое увеличение мощности неоген–четвертичных отложений.

По разнице глубин отражающего горизонта в Южно-Ферганской разрывной зоне амплитуда вертикальных неоген–четвертичных движений достигает 3000 м, амплитуда горизонтального составляющего составляет 800–1000 м. Южно-Ферганская флексурная зона представляет собой сочетание взбросо-сдвигов и флексур. На южном приподнятом крыле широко распространены антиклинальные складки, развивающиеся парагенетически и повторяющие простирание данной зоны.

В ее пределах возникали разрушительные землетрясения [9]:

- 838 г. ($M = 5.3$, $H = 10$ км);
- 1822 г. ($M = 6.4$, $H = 20$ км);
- 1902 г. – Андижанское ($M = 5.8$, $H = 30$ км);
- 1903 г. – Аимское ($M = 6.1$, $H = 14$ км);
- 1942 г. – Пайтоксское ($M = 5.9$, $H = 21$ км);
- 1947 г. – Каракалпакское ($M = 5.9$, $H = 13$ км).

СЕЙСМОТЕКТОНИКА ФЕРГАНСКОЙ ВПАДИНЫ

В пределах Западного Тянь-Шаня Ферганская впадина занимает особое положение. В ее пределах с исторических времен возникали сильные и разрушительные землетрясения. От 838 года по 2016 год в пределах Ферганской впадины и сопредельных территорий возникли более 87 землетрясений с магнитудой $M \geq 4.5$ и интенсивностью от 6 до 9 баллов, из них имели магнитуду:

- $M \geq 6.0$ (13 землетрясений);
- $5.9 \geq M \geq 5.0$ (44 землетрясения);
- $4.9 \geq M \geq 4.5$ (30 землетрясений).

Из общего числа землетрясений Чаткальское землетрясение 1946 г. проявилось силой 9–10 баллов. В 20-ти случаях интенсивность достигала 8–9 баллов. Интенсивность остальных землетрясений составляла 6–7 баллов. Практически все землетрясения возникали в зонах динамического влияния активных разломов. В ареале динамического влияния Северо-Ферганской флексурно-разрывной зоны отмечено семь землетрясений с магнитудой $M \geq 4.9$.

Сила землетрясения, возникшего в 1620 году, которое разрушило крепость Ахсы, оценивается в 6 баллов [9]. Второе землетрясение с магнитудой $M = 6.0$ произошло в районе Кайракумского водохранилища в 1985 г. с магнитудой $M = 6.0$ и интенсивностью в эпицентре 7–8 баллов.

Сильные землетрясения возникли в 1902 (Андижанское землетрясение, $M = 6.4$) и 1903 (Аимское землетрясение, $M = 6.4$) годах. Кроме этих землетрясений в зоне динамического влияния Южно-Ферганской флексурно-разрывной зоны возникли более шести землетрясений с $M \geq 5.0$. Анализ пространственного распределения эпицентров слабых землетрясений с $1.5 \leq M \leq 4.9$ возникших за период 2016–2017 г.г. показал, что наряду с приуроченностью эпицентров к зонам активных разломов, наблюдается значимое увеличение их в отдельных блоках, расположенных между активными разломами.

Таким образом, основная масса сильных землетрясений концентрируется в наиболее напряженных участках земной коры Западного Тянь-Шаня, а именно – в краевых разломах и флексурно-разрывных зонах.

Для анализа современных движений и деформаций земной коры были использованы результаты наземных инструментальных измерений, материалы посовременному трещинообразованию, данные спутниковой геодезии и макросейсмического обследования сильных землетрясений. Изучение скоростей вертикальных движений тектонических структур Скандинавского полуострова и островов Японского архипелага показало, что движения имеют колебательный циклический характер.

Для выявления тенденции современных движений было проведено изучение взаимосвязи молодых, новейших и современных движений и составлена карта-схема современных вертикальных движений тектонических структур Средней Азии [22] (рис. 3, изолинии).

Данная карта была нами дополнена сетью активных разломов. Совместный анализ сейсмичности и неотектоники показал, что участки, подверженные наиболее высоким или низким показателям современных движений, скорее всего, очерчивают блоки земной коры, для которых характерны высокие тектонические напряжения. Разломы, разделяющие эти блоки, отличаются высоким напряженным состоянием и являются потенциально сейсмоопасными.

Сравнительное рассмотрение схемы неотектоники и современных движений показывает высокую степень унаследованности современных движений новейшими движениями и детальный анализ неотектонических движений при сейсмо-тектонических исследованиях необходим. Ценную информацию представляют материалы по современному трещинообразованию. В пределах Западного Тянь-Шаня участки современного трещинообразования наблюдаются на плоских участках внутригорных (Ферганская) и предгорных (Ташкентско-Голодностепская) впадин [22].

Инструментальные наблюдения на Ферганской впадине показали, что (см. рис. 2):

- гамма-активность в зонах разломов и трещинообразования резко отличается от фоновых значений;
- выявлены сжимающиеся и растягивающиеся трещины;
- участки трещинообразования располагаются в зоне динамического влияния Южно-Ферганской флексурно-разрывной зоны и повторяют ее простираение;
- результаты повторного нивелирования за период 1971–1974 г.г. по линии Ташкумыр–Андижан–Ош показали аномальные значения скорости вертикальных движений (-46 ± 9 мм/год) на отрезке Андижан–Карасу.

Таким образом, можно утверждать, что ось сжимающих напряжений была ориентирована в сумеридиональном направлении, ось растягивающих напряжений была ориентирована в субширотном направлении.

В Ташкентско-Голодностепской впадине также выявлены участки интенсивного трещинообразования на территории Паркентского района Ташкентской области. Трещины ориентированы по трем направлениям:

- северо-восточное ($L 40^\circ - 60^\circ$);
- северо-западное ($L 300^\circ - 320^\circ$);
- меридиональное.

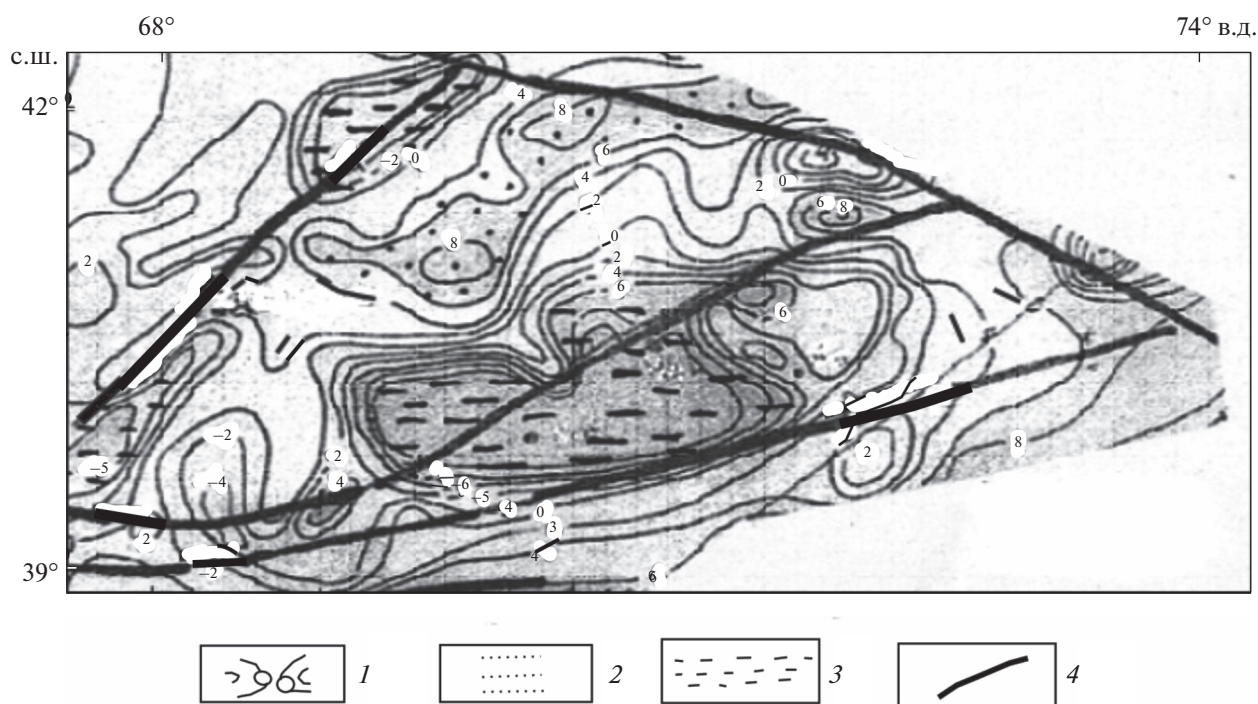


Рис. 3. Карта-схема современных тектонических движений земной коры в регионе Средней Азии, (по данным [24], оригинальное воспроизведение основы, с добавлениями).

1 – изолинии скоростей вертикальных движений (мм/год); 2 – поднятия; 3 – опускания; 4 – активные разрывные нарушения

В рельефе отмечены каналы, рвы и щели. Исследования показали, что гамма-активность в зонах трещинообразования повышена относительно фонового излучения. Закартированные участки современного трещинообразования составляют единую зону, располагающуюся между Сюренагинским и Сукокским разломами, разграничивающих Паркент-Нурекатинский грабен северо-восточного простирания с двух сторон [22].

Возможность высокоточных измерений современных движений земной коры появилась в результате создания глобальной системы позиционирования GPS мониторинга и развития на ее основе методов космической геодезии. По данным GPS определены вектора и скорости перемещения пунктов наблюдений относительно стабильной части Евразии.

В результате исследования геодинамики Памиро-Пенджабского синтаксиса и анализа данных космической геодезии было отмечено, что перемещения к северу пунктов, расположенных на Памире, в Северо-Западном Куньлуне и в Тариме, происходят с близкими скоростями 15–20 мм/год [6].

Это свидетельствует о том, что в настоящее время Памир и Тибет перемещаются в сторону Тянь-Шаня совместно. На границе этого сближения Тарим пододвигается под Тянь-Шань.

В пределах Западного Тянь-Шаня можно выделить несколько районов, отличающихся ориен-

тацией векторов скоростей перемещения. Приведены пункты наблюдений GPS [16] (см. рис. 2, кружочки черным). Таласская группа скоростей перемещения, относительно середины Ферганской впадины, направлена на юг. Векторы скорости пунктов, расположенных на юго-запад от сдвига в пределах Ферганского хребта, ориентированы на северо-запад.

Обе группы направлений подчеркивают современную геодинамическую обстановку в зоне Таласо-Ферганского правостороннего сдвига. Группа пунктов наблюдения, расположенная в пределах Чаткало-Кураминского региона, ориентирована в южном направлении и подтверждает раннее предположение, что к западу от Таласо-Ферганского сдвига на фоне меридионального сжатия происходит выталкивание блоков к западу с левосторонним (против часовой стрелки) вращением блоков.

Группа пунктов наблюдений, расположенная в пределах южной части Ферганской впадины и Алайской долины, ориентирована субмеридионально. По величине перемещений пункты наблюдений, расположенные в равнинных частях (Ферганская впадина), уступают пунктам, расположенным в горных областях. Материалы космической геодезии подтверждают субмеридиональную ориентацию сжимающих напряжений, действующих в пределах Западного Тянь-Шаня и

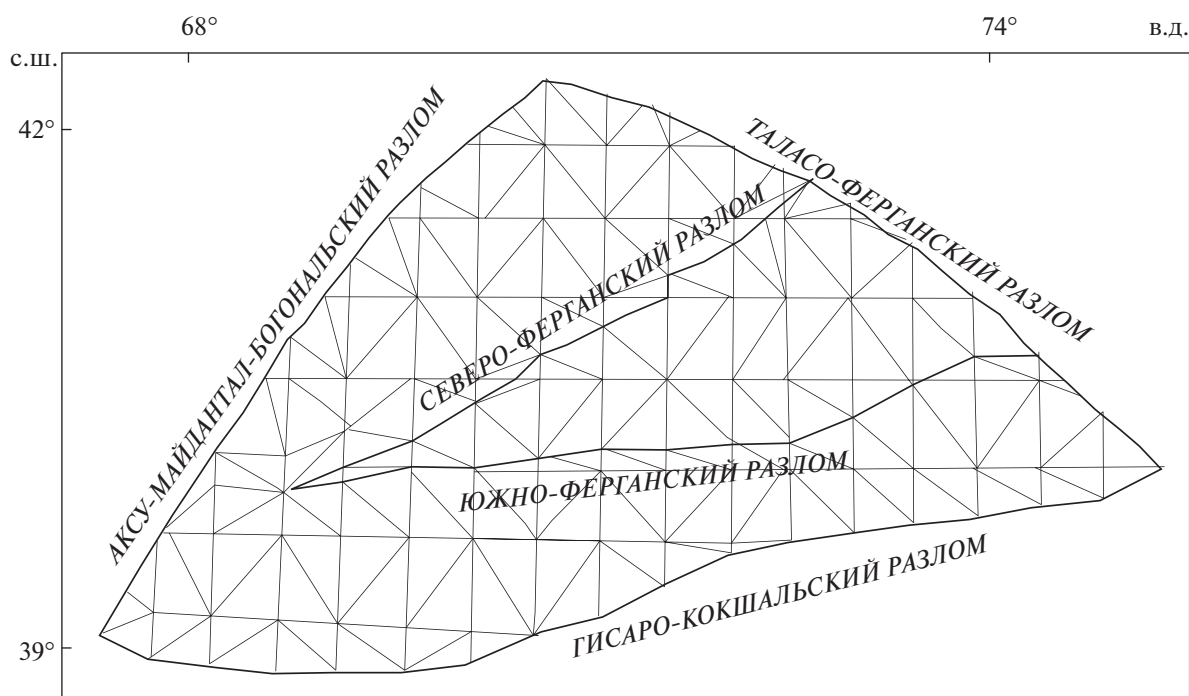


Рис. 4. Расчетная область для уравнений (7)–(9) разделена на треугольные сетки, в узлах которых находится численные решения.

связанных, вероятно, с давлением Памирского выступа на Тянь-Шань [6].

Ценную информацию также представляют материалы макросейсмического описания сейсмодислокаций, обнаруженных после сильных землетрясений. Известно, что при сильных землетрясениях возникают заметные изменения в рельефе плейстоценовой области, по которым можно судить о механизме подвижек в очаге землетрясения.

При этом, чем сильнее интенсивность толчка, тем разнообразнее типы сейсмотектонических дислокаций. Они особенно четко фиксируются в горных и предгорных районах. Сейсмотектонические дислокации по времени проявления разделяются на современные и исторические, а также доисторические (палеосейсмодислокации).

Составленная нами карта учитывает характерные изменения в рельефе плейстоценовых областей после следующих сильных землетрясений:

- Андижанское (3.12.1902 г. $M = 6.4$, $H = 10$ км);
- Чаткальское (3.11.1946 г. $M = 7.8$, $H = 20$ км);
- Маркайское (3.08.1962 г. $M = 5.4$, $H = 18$ км);
- Бричмуллинское (24.10.1959 г. $M = 5.8$, $H = 13$ км);
- Ташкентское (26.04.1966 г. $M = 5.3$, $H = 8$ км);
- Пскентское (19.01.1970 г. $M = 4.7$, $H = 25$ км);
- Таваксайское (6.12.1977 г. $M = 4.7$, $H = 13$ км);
- Назарбекское (11.12.1980 г. $M = 5.2$, $H = 16.5$ км);
- Папское (17.02.1984 г. $M = 5.7$, $H = 15$ км).

Пространственный и морфологический анализ эпицентральных зон показал, что сейсмодислокации согласуются с пространственно-кинематическими характеристиками активных разломов, при этом очаги сильных землетрясений возникали при тектонических условиях субмеридионального сжатия.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Для анализа напряженного состояния земной коры Западного Тянь-Шаня выделена территория, ограниченная с северо-востока Таласо-Ферганским, с юга – Гиссаро-Кокшальским глубинными разломами и северо-запада Аксу-Майдантальскими системами разломов, и заключенная в области с географическими координатами ($39^{\circ}43'$ с.ш., $69^{\circ}74'$ в.д.) (рис. 4).

В качестве геодинамической модели напряжений с учетом двух активных разломов взята весома призма, состоящая из трех зонально-однородных частей, которая покоится на пластическом основании. Верхняя поверхность призм соответствуют рельефу, нижняя поверхность призм – поверхности Мохо (рис. 5, рис. 6).

Рассмотрим задачу ползущего движения такой среды под действием приложенных сил на боковых границах. Подобная задача для региона Центральной Азии рассмотрена в [1], решением сле-

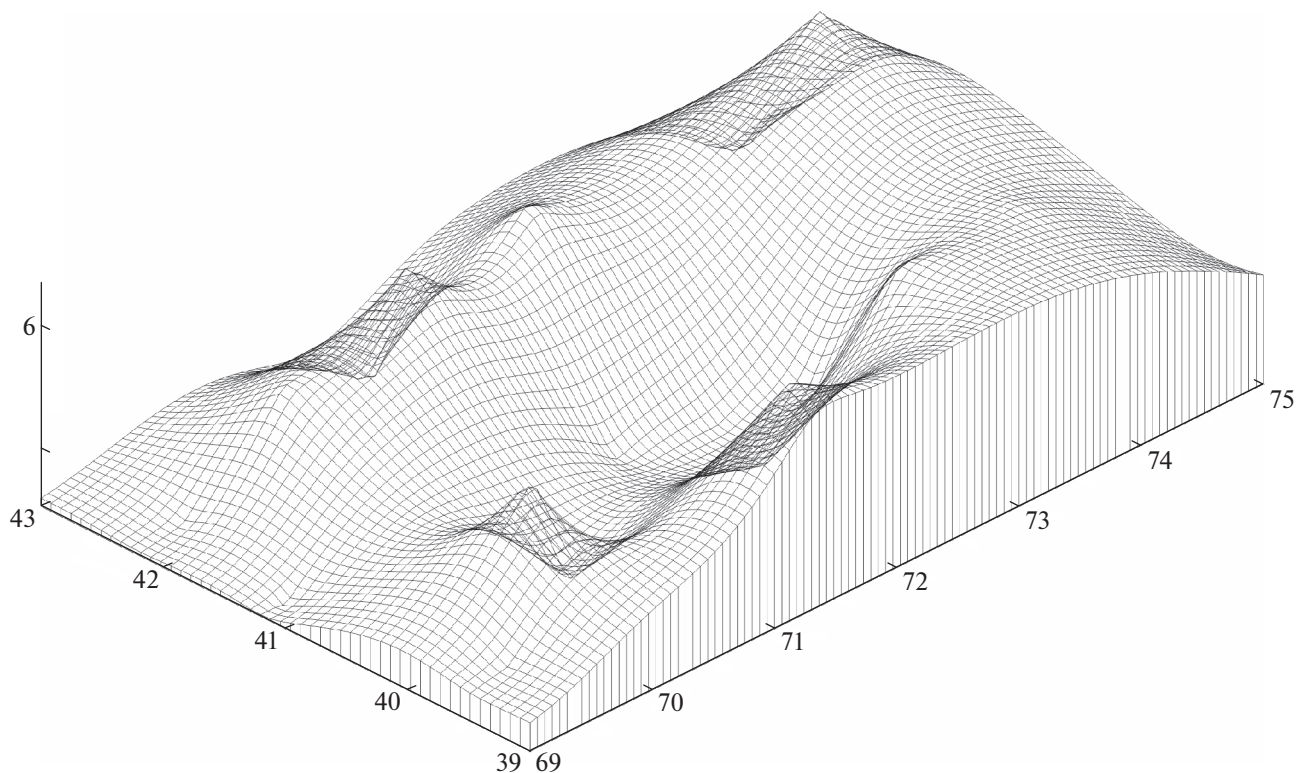


Рис. 5. Рельеф Западного Тянь-Шаня. Обозначения на осях: вертикальная ось (высота рельефа, км), горизонтальные оси (широта и долгота, градусы).

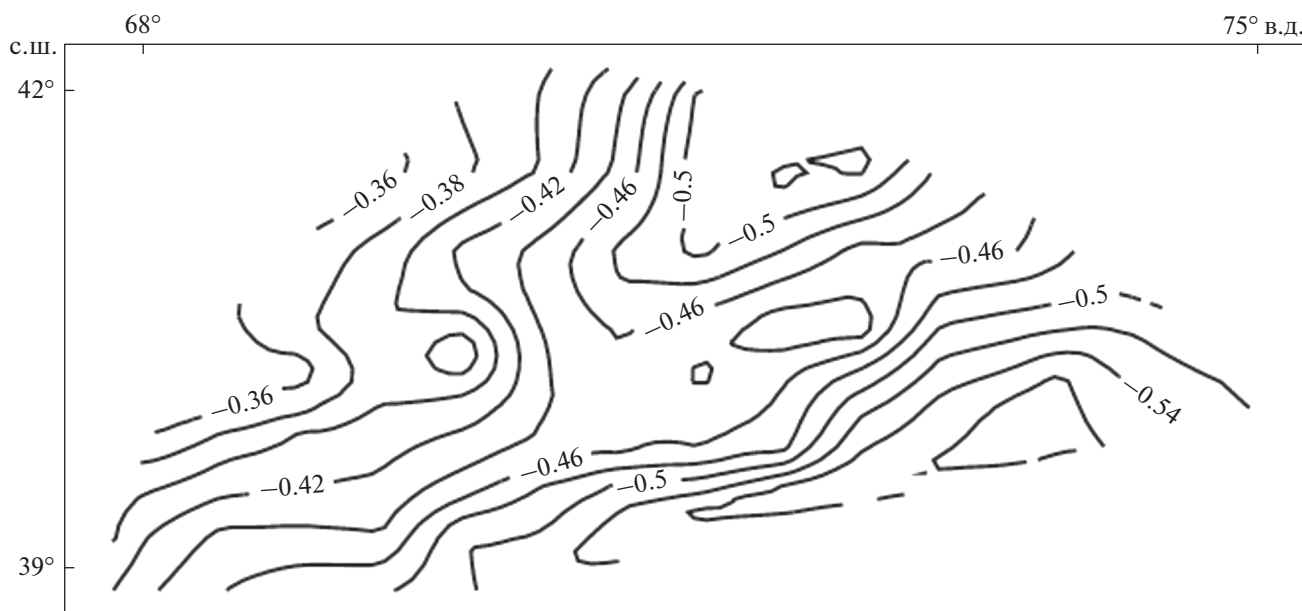


Рис. 6. Изолинии глубин подошвы земной коры Западного Тянь-Шаня (граница Мохо), отнесенная к 100 км в принятой системе координат (по данным [4]).

дующей системы трехмерных уравнений равновесия моментной сплошной среды:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + F_i &= 0, \\ \mu_{ij,j} + \epsilon_{ijk}\sigma_{kj} + M_i &= 0, \\ i, j &= 1, 2, 3. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь σ_{ij} , компоненты тензора напряжений, индекс j после запятой означает дифференцирование по декартовым координатам x_j , F_i – массовая сила, μ_{ij} компоненты моментного тензора напряжений, ϵ_{ijk} – тензор Леви–Чивита, M_i – составляющие удельного момента, имеющие размерность

момента. По повторяющимся индексам проводится суммирование.

Эти уравнения усреднены по вертикали с помощью формулы:

$$\bar{w}(x_1, x_2) = \frac{1}{(h-H)} \int_H^h w(x_1, x_2, x_3) dx_3. \quad (2)$$

В формуле (2) усредненные переменные обозначаются с чертой.

Декартовы координаты в системе (1) расположены на земной поверхности:

x_1, x_2 направлены по параллели и по меридиану, x_3 – вверх, формула $x_3 = H(x_1, x_2)$ соответствует рельефу земной поверхности, $x_3 = h(x_1, x_2)$ соответствует границе Мохо.

В работе [1] в качестве $h = \text{const}$ принята нижняя граница литосферы в виде плоскости, поэтому при усреднении системы (1) по формуле (2) члены, содержащие производные h по x_1, x_2 , автоматически выпадают.

В нашем случае граница Мохо не плоская и $h(x_1, x_2)$ и не постоянна. В таком случае, замена усредненных производных напряжений при преобразовании (1) производится по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{1}{h-H} \int_H^h \sigma_{ij} dx_3 \right) = \frac{1}{(h-H)^2} \times \\ &\times \int_H^h \sigma_{ij} dx_3 + \frac{1}{h-H} \int_H^h \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_k} dx_3 + \\ &+ \frac{1}{(h-H)} \sigma_{ij} \Big|_{x_3=h} \frac{\partial h}{\partial x_k} - \frac{1}{(h-H)} \sigma_{ij} \Big|_{x_3=H} \frac{\partial H}{\partial x_k} = \quad (3) \\ &= \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} + \frac{\sigma_{ij}(x_1, x_2, h)}{(h-H)} \frac{\partial h}{\partial x_k} + \\ &+ \frac{(\bar{\sigma}_{ij} - \sigma_{ij}(x_1, x_2, H)) \partial H}{(h-H) \partial x_k}. \end{aligned}$$

В формуле (3) присутствуют значения напряжений на свободной поверхности $\sigma_{ij}(x_1, x_2, H)$ и на границе Мохо $\sigma_{ij}(x_1, x_2, h)$. Относительно $\sigma_{ij}(x_1, x_2, H)$ используем известные эмпирические оценки напряжений для различных глубин земной коры. Для горизонтальных напряжений в складчатом и кристаллическом фундаменте земной коры выведены формулы, составленные по [6], в виде $(\sigma(h) = 0.06 + 0.31 \times 10^{-3}h)$, где h – глубина в км) кг/см².

Наша модель ориентирована на известные оценки касательных напряжений на территории бывшего СССР, установленные эмпирически приблизительно для глубин 15–20 км [7, 23].

Поэтому отношение горизонтальных напряжений на поверхности по отношению к средним

напряжениям, возьмем в виде отношений напряжений на 2 км (приблизительная средняя граница начала кристаллического фундамента) и 15 км по формуле:

$$\frac{\sigma_{11}(x_1, x_2, H)}{\sigma_{11}(x_1, x_2)} = \frac{\sigma(2 \text{ км})}{\sigma(15 \text{ км})} \approx 0.15, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{11}(x_1, x_2) - \sigma_{11}(x_1, x_2, H) &= \\ = 0.85 \bar{\sigma}_{11}(x_1, x_2) &= p \bar{\sigma}_{11}(x_1, x_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Относительно $\sigma_{11}(x_1, x_2, h)$ действия следующие: известно, что начиная с некоторых глубин, разница главных горизонтальных напряжений и вертикальной составляющей напряжений нивелируются, и тензор напряжения становится шаровым. Косвенное свидетельство этого факта демонстрирует базальтовый слой земной коры, где почти отсутствуют землетрясения. Принимаем на уровне Мохо $\sigma_{11}(x_1, x_2, h)$ и $\sigma_{22}(x_1, x_2, h)$ за главные горизонтальные напряжения, приравняем их вертикальному напряжению при $x_3 = h(x_1, x_2)$:

$$\begin{aligned} \sigma_{33}(x_1, x_2, h) &= \rho g [h(x_1, x_2) - H(x_1, x_2)], \\ \sigma_{31}(x_1, x_2, h) &= k_a \sigma_{33}(x_1, x_2, h), \\ \sigma_{32}(x_1, x_2, h) &= k_a \sigma_{33}(x_1, x_2, h), \end{aligned}$$

где k_a – коэффициент трения.

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} &= \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_k} - \rho g \frac{\partial (h-H)}{\partial x_k} \delta_{ij} - \\ &- \frac{(\bar{\sigma}_{ij} - \sigma_{ij}(x_1, x_2, H)) \partial H}{(h-H) \partial x_k}. \end{aligned} \quad (6)$$

Отнесем линейные переменные к средней мощности земной коры L , усредненные скорости перемещений к L/t_0 (t_0 – масштаб времени), напряжения к μ_0/t_0 (μ_0 – средняя вязкость составных блоков). Остальные преобразования уравнения (1) проводятся по [1]. Сохраняя прежними обозначения относительных переменных, в результате получим следующее уравнение Стокса, относительно безразмерных усредненных скоростей перемещения:

$$-\text{grad } \bar{p} + \frac{\mu}{\mu_0} \Delta \bar{v} = \bar{F}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{p}{(h-H)} \bar{\sigma}_{11} \frac{\partial H}{\partial x_1} + \frac{p}{(h-H)} \bar{\sigma}_{12} \frac{\partial H}{\partial x_2} - \\ &- \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{p}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_1} v_1 \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \times \\ &\times \left[\frac{2p}{(h-H)} \frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{\partial H}{\partial x_2} v_1 + \frac{\partial H}{\partial x_1} v_2 \right) \right] - \frac{1}{(h-H)} \times \\ &\times \left[v_3(x_1, x_2, H) \frac{\partial H}{\partial x_1} + \frac{\partial v_3(x_1, x_2, H)}{\partial x_1} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

$$F_2 = \frac{1}{2(h-H)} \overline{\sigma_{21}} \frac{\partial H}{\partial x_1} + \frac{1}{2(h-H)} \overline{\sigma_{22}} \frac{\partial H}{\partial x_2} - \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{2p}{(h-H)} \mu \left(\frac{\partial H}{\partial x_2} v_1 + \frac{\partial H}{\partial x_1} v_2 \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{p}{(h-H)} \frac{\partial H}{\partial x_2} v_2 \right) - \frac{1}{(h-H)} \left[v_3(x_1, x_2, H) \frac{\partial H}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3(x_1, x_2, H)}{\partial x_2} \right]. \quad (9)$$

Здесь принято $v_3(x_1, x_2, h) = 0$, $k_a = 0$.

Усредненное уравнение несжимаемости принимает следующий вид:

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} - \frac{p}{(h-H)} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} v_1 + \frac{\partial H}{\partial x_2} v_2 \right) + \frac{1}{(h-H)} v_3(x_1, x_2, H) = 0. \quad (10)$$

В формулах (7)–(10) усредненные напряжения (σ_{ij} с чертой) являются решениями реконструированной упругой задачи [23].

Таким образом, 3D задача свелась к 2D задаче, относительно горизонтальных средних скоростей. Уравнения для горизонтальных средних скоростей перемещений решаются в плоской области, ограниченной внешними границами региона исследования (см. рис. 4). Отражена 2D область в плане, которая имеет рельеф и основание границы Мохо (см. рис. 4, см. рис. 5, см. рис. 6). Поверхность рельефа от нулевого уровня вверх строилась по данным физических карт, а изолинии границы Мохо от нулевого уровня вниз – по данным [4], при помощи программы Surfer [35].

Два активных разлома разделяют рассматриваемую область на три блока с различными вязкостями μ . На контакте границ блоков ставились условия непрерывности напряжений и скоростей перемещений.

Граничные условия для уравнений (7)–(9) выбирались следующим образом. Евразийская плита считалась относительно неподвижной. Скорости перемещений левого борта Таласо-Ферганского глубинного разлома приняты по современным данным GPS. На остальных внешних границах выбирались напряжения, которые рассчитаны по модели [23] в качестве внутренних граничных условий.

Уравнения (7)–(10) при описанных граничных условиях решались методом граничных интегральных уравнений. Методика решения и дальнейшая процедура получения численных решений, которая реализовалась в среде программирования Дельфи [23]. Значения вязкостей корректировались сравнением модельных значений ско-

рости и угловой скорости с аналогичными значениями, построенные по данным GPS, имеющимся для Ферганской впадины [34].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Скорости перемещений и поля напряжений Западного Тянь-Шаня

Приведены скорости перемещений и тангенциальные напряжения, полученные в результате численной реализации (рис. 7, рис. 8).

Результаты показывают, что территория Ферганской впадины вращается против часовой стрелки вокруг точки с координатами (39°8' с.ш., 69°9' в.д.) со скоростью угла вращения 4 нанорадиан/год. Вертикальные скорости на поверхности $v_3(x_1, x_2, H)$, в предположении $v_3(x_1, x_2, h) = 0$, построены по формуле (10), вполне согласуются с установленными инструментальными данными (см. рис. 3, рис. 9).

Поле скоростей перемещения, полученные в результате решения модельной задачи, сгруппированы на отдельные участки по типу направления движения (рис. 10).

В результате исследуемая территория разделилась на несколько блоков. Границы блоков практически совпадают с разрывными нарушениями более высокого ранга (см. рис. 2).

Геодинамическое состояние земной коры зачастую оценивается по значениям коэффициента Лоде–Надаи:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (11)$$

с трактовкой, что сжатию соответствует $\mu_\sigma = +1$, растяжению $\mu_\sigma = -1$ и сдвигу $\mu_\sigma = 0$.

Надо отметить, что данное утверждение в общих случаях неверно. Этот коэффициент введен изначально при проведении экспериментов на пластичность тонкостенных труб на одновременное растяжение с внутренним давлением и кручением.

В экспериментах А.А. Ильюшина [10] установлено, что противовес проведенной трактовке равномерному растяжению в двух направлениях соответствует $\mu_\sigma = 1$, одноосному растяжению $\mu_\sigma = -1$.

Значения $\mu_\sigma = +1$, как видно по формуле (11), достигается во всех случаях, когда эллипсоид напряжений является эллипсоидом вращения $\sigma_1 = \sigma_2$, не важно, что при этом эти напряжения являются напряжениями сжатия или растяжения. Аналогично $\mu_\sigma = -1$ при $\sigma_2 = \sigma_3$, независимо от растяжения или сжатия. Таким образом, утверждение о геодинамическом состоянии земной коры на основе коэффициента μ_σ (сжатия $\mu_\sigma = +1$,

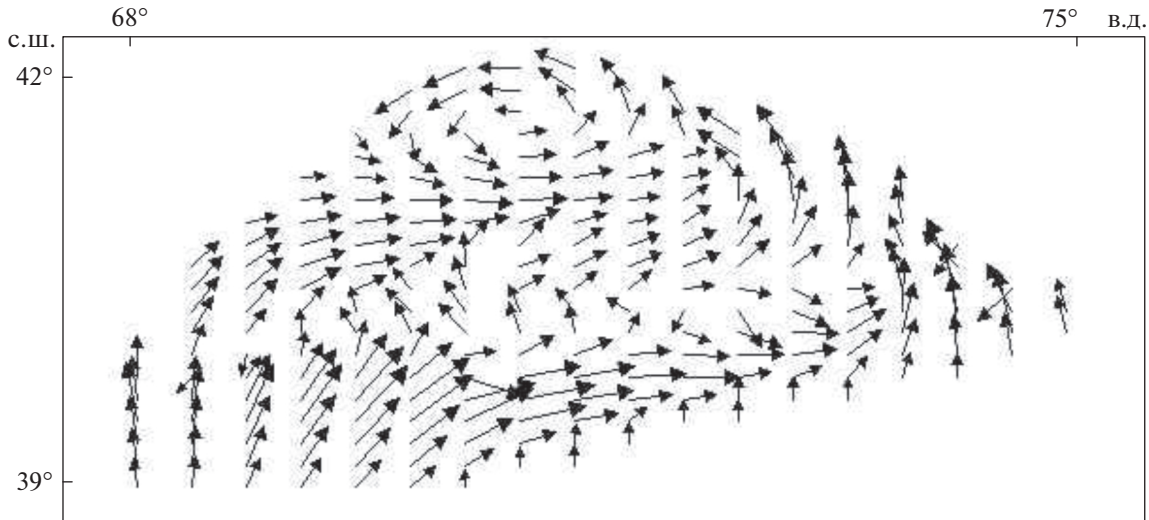


Рис. 7. Поле скоростей по результатам численной модели.



Рис. 8. Тангенциальные напряжения $\sigma_{\tau}/2 \times 10^8$ Па на глубине 15 км по результатам численной модели.

растяжения $\mu_{\sigma} = -1$) пригодно только при одноосном сжатии или растяжении (эллипсоид становится прямой линией).

Несмотря на неоднозначность оценки состояния земной коры по коэффициенту Лоде–Надаи при $\mu_{\sigma} = \pm 1$, случай $\mu_{\sigma} = 0$ точно отвечает сдвигу. Для выражения этого коэффициента, мы построили поле главных векторов напряжений σ_1, σ_2 в нашей задаче через решение средних напряжений σ_{ij} по формуле:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2}{2} + \sigma_{12}^2}. \quad (12)$$

В качестве третьей компоненты напряжений σ_3 приняли вес вышележащей породы. В нашем при-

мере значение +1 этого коэффициента соответствует середине территории, которая находится в состоянии равномерного растяжения (рис. 11).

Таким образом, на основании учета двух разрывных нарушений 2-го ранга, можно утверждать, что разрывные нарушения более высокого ранга обусловлены перераспределением энергии внешних воздействий, передающихся через разрывные нарушения более низкого ранга.

Для более уверенной констатации этого утверждения мы проанализировали очаги землетрясений в регионе за период 1902–2017 гг., сопоставив границы блоков, выделенные по численному решению, с сейсмологическими данными (рис. 12).

Были проанализированы особенности проявления слабых землетрясений в пределах Западно-



Рис. 9. Вертикальное движение (мм/год) по решениям модельной задачи.

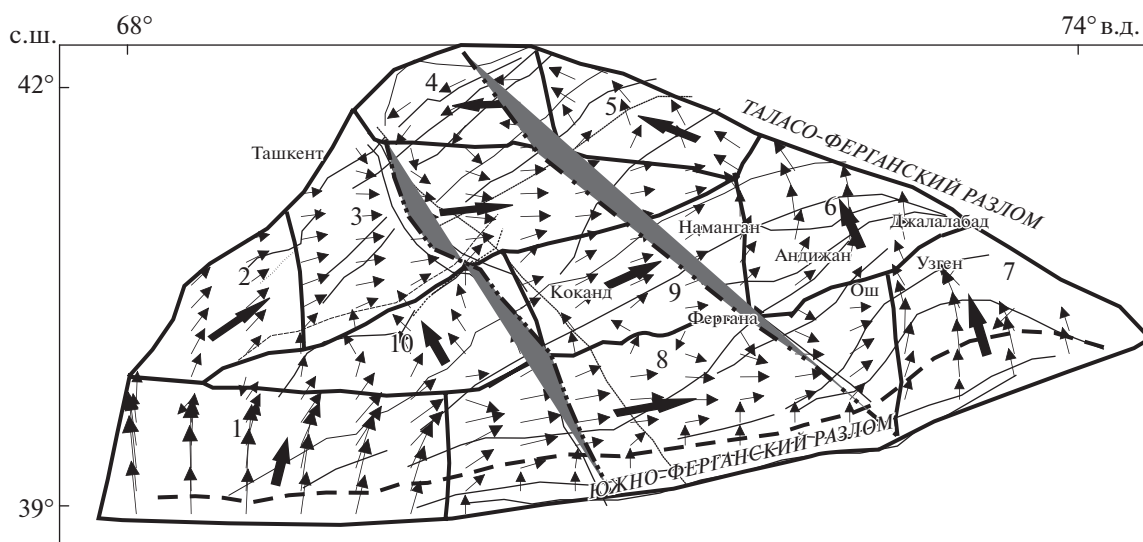


Рис. 10. Сгруппированные по направлениям скорости перемещений из решения модельной задачи.

го Тянь-Шаня. Результаты анализа показали, что в разных блоках количество слабых землетрясений, возникшие за указанный промежуток времени, варьирует в широких пределах.

По всей протяженности Гиссаро-Кокшаальского разлома, являющегося южной границей в зоне Таласо-Ферганского разлома, которая является северо-восточной границей Западного Тянь-Шаня, — преобладают сжимающие напряжения. В отличие от этого, в структуре Западного Тянь-Шаня распределение напряжений достаточно разнообразное.

Блоки, выделенные здесь, имеют более высокую прочность и эффективную жесткость в сравнении с разломными зонами, а разломные зоны выполняют также роль места сброса энергии накопленных деформаций. Большая часть сил внеш-

него воздействия в пределах Западного Тянь-Шаня расходуется во внутренних сейсмоактивных разломных зонах.

Необходимо отметить, что блоки, выделенные по результатам численной модели, послужили основой для более детального анализа комплекса геолого-геофизических данных и оконтуриванию блоков 3-го ранга. Далее мы сопоставили границы блоков, выделенных по результатам математического моделирования, с границами блоков по данным комплекса геолого-геофизических, сейсмотектонических, глубинного строения, неотектонических и современных вертикальных тектонических движений (см. рис. 2).

Если учесть, что по геолого-геофизическим данным границы блоков обусловлены активными разломами и указывают выход разломов на

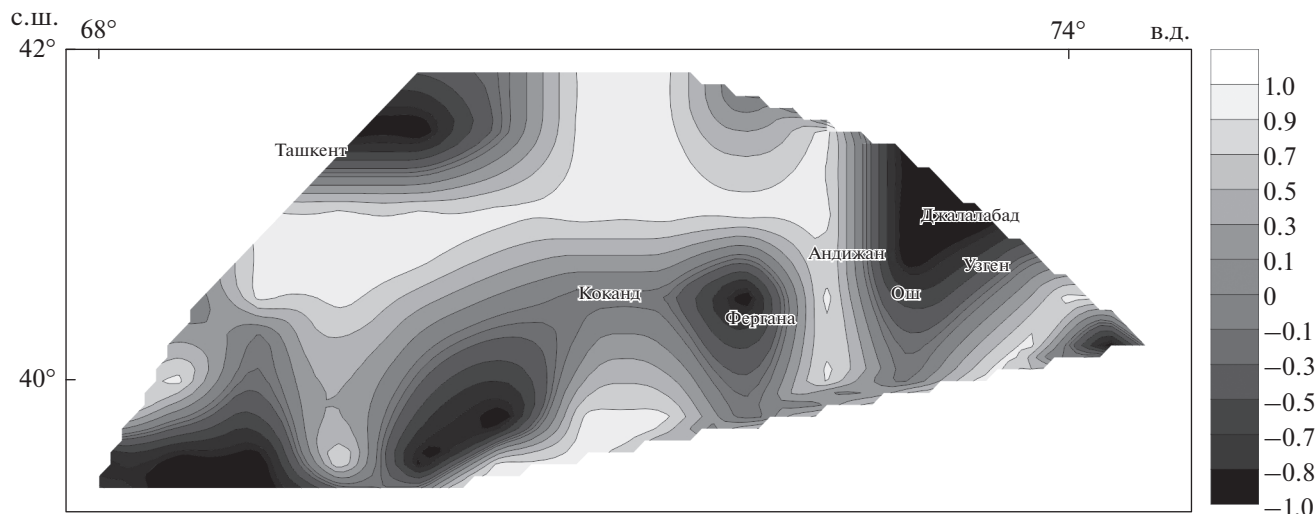


Рис. 11. Изолинии коэффициента Лове–Надаи по решению модельной задачи.

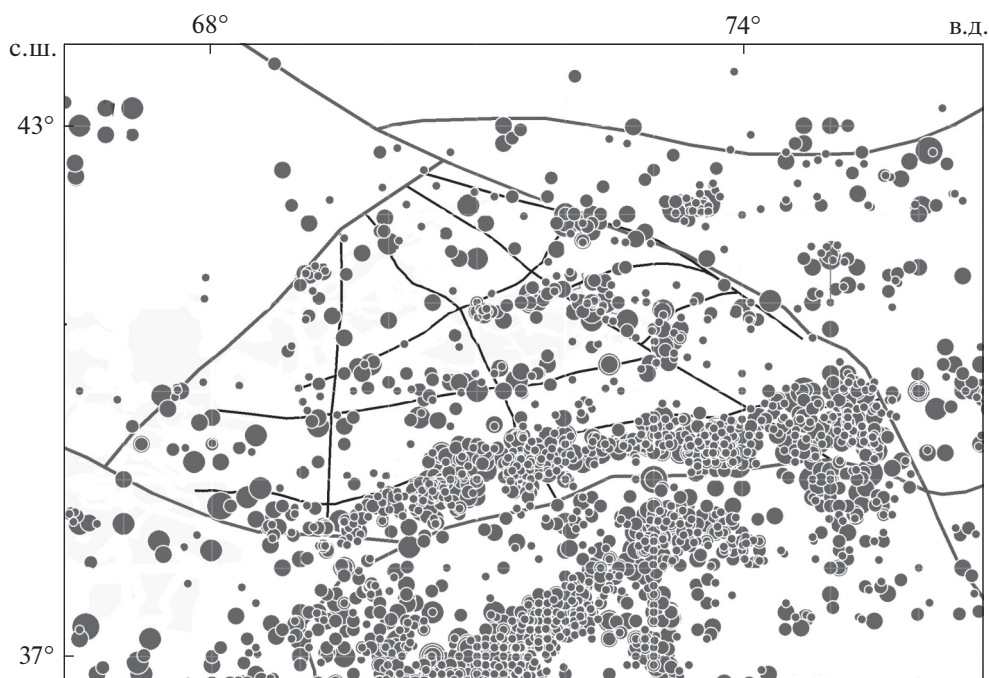


Рис. 12. Эпицентры землетрясений $M \geq 4$, произошедших в 1902–2017 годах, наложенные на условные границы разнонаправленных движений и выделенные по решению модельной задачи.

дневную поверхность, а границы векторных полей, выделенные на основе моделирования, носят усредненный характер, — то наблюдаемые расхождения, по нашему мнению, вполне допустимы.

Границы блоков принимаются зонами наибольшей концентрации тектонических напряжений, а угол расхождения между векторами позволяет оценить степень напряженности. Чем больше угол расхождения векторных полей, тем больше вероятность повышенных тектонических напряжений. Направления векторов, не согласовываю-

щихся с региональным полем напряжений, требуют более детального анализа.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют, что наибольшим напряженным состоянием отличаются разломы блоков 1-го ранга, характерные размеры которых измеряются несколькими сотнями километров. Разломы, разграничивающие блоки 2-го ранга, относятся к категории краевых разломов, которые способны генерировать землетрясения до $M \leq 7.0$.

Следующий уровень тектонических структур, отличающихся повышенным напряженным со-

стоянием, являются блоки 3-го ранга, в приграничных зонах которых могут возникать землетрясения с магнитудой $M \leq 6.0$.

ВЫВОДЫ

1. Построена карта амплитуд неотектонических движений и выделены структуры 2-го и 3-го ранга региона Западного Тянь-Шаня.

2. Выделенные активные разломы 2-го ранга послужили основой для математической модели напряжений на базе уравнения Стокса.

3. Полученные поля скоростей сгруппированы по типам направления движения и на этом основании вся территория разделена на блоки 3-го ранга.

4. В результате геодинамического анализа напряжений получено подтверждение разделения региона исследования на несколько блоков, которые ограничены разрывными нарушениями более высокого ранга.

5. Анализ очагов землетрясений также указывает на концентрацию очагов в пределах границ блоков.

6. Решение модельной задачи подтверждает определяющую роль разломов в процессе перераспределения напряжений.

Благодарности. Авторы искренне признательны А.Н. Галыбину (ИФЗ РАН, г. Москва, Россия) за обсуждение вывода формул осреднения. Авторы благодарны анонимным рецензентам за конструктивные комментарии и редактору за тщательное редактирование.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства инновационного развития Республики Узбекистан (гранты № 8-007, № 20170918 111).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атабеков И.У. Опыт моделирования сеймотектонического течения земной коры Центральной Азии // *Физика Земли*. 2021. № 1. С. 122–132. <https://doi.org/10.31857/S0002333721010014>
2. Атабеков И.У., Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимов Т.Л., Мирзаев М.А. Связь сильных землетрясений с активацией глубинных разломов в Центральной Азии (Узбекистан): численное моделирование вариации полей напряжения // *Геотектоника*. 2021. № 3. С. 78–95. <https://doi.org/10.31857/S0016853X21030036>
3. Бабеев А.М. Важнейшие сейсмогенные разломы Таджикистана. – В кн. *Сеймотектоника некоторых районов Юга СССР*. – Под ред. И.Е. Губина – М.: Наука, 1976. С. 91–105.
4. Брагин В.Д., Лобаченко А.Н. Гравитационное поле. – В кн. *Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия)*. – М.: Научный мир, 2005. С. 52–58.
5. Булин Н.К. Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры // *Геотектоника*. 1971. № 3. С. 3–15.
6. Буртман В.С. Тянь-Шань и Высокая Азия: Геодинамика в кайнозое. – Под ред. Ю.Г. Леонова – М.: ГЕОС, 2012. 186 с. (Тр. ГИН РАН. 2012. Вып. 603).
7. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1964. 536 с.
8. Зуннунов Ф.Х., Зильберштейн М.Б., Перельман И.И., Пак В.А., Пшеничная З.Д., Харитонов А.И., Грудкин К.А., Ефимов Г.П. Глубинное геологическое строение Ферганской межгорной впадины и его изучение геофизическими методами. – Под ред. Т.Л. Бабаджанова – Ташкент: ФАН, 1973. 192 с.
9. Ибрагимов Р.Н. Сейсмогенные зоны Среднего Тянь-Шаня. – Под ред. Г.А. Мавлянова – Ташкент: ФАН, 1978. 144 с.
10. Ильюшин А.А. Пластичность. – М.: ОГИЗ, 1948 г. 388с.
11. Карта новейших тектонических движений Юга СССР. – М-б 1: 1000000 – Под ред. Л.П. Полкановой – М.: ГУКГ при СМ СССР, 1972.
12. Костюк А.Д., Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Яги Ю. Деформация земной коры северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // *Физика Земли*. 2010. № 3. С. 52–65.
13. Кузиков С.И., Мухамедиев Ш.А. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети // *Физика Земли*. 2010. № 7. С. 33–51.
14. Кузьмин Ю.О. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике // *Физика Земли*. 2017. № 6. С. 24–39. <https://doi.org/10.7868/S0002333717060023>
15. Ситдиков Б.Б. Новейшая тектоника Центральных Кызылкумов. – Под ред. А.М. Акрамходжева – Ташкент: ФАН, 1976. С. 37–72.
16. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования. М.: Научный Мир, 2005 г. 399 с.
17. Ходжаев А.К. Палеосейсмогеология Чаткало-Курраминского региона. – Под ред. Р.Н. Ибрагимова – Ташкент: ФАН, 1985. 132 с.
18. Таль-Вирский Б.Б. Геофизические поля, глубинное строение земной коры и мантии, сейсмичность и современные движения. – В кн. *Геология и полезные ископаемые Республики Узбекистан*. – Ташкент: Университет, 1998. С. 369–427.
19. Троицкий В.И., Садыков Ю.М., Денисов Р.И. К карте новейших тектонических движений Узбекистана. – В сб.: *Проблемы сейсмологии в Узбекистане*. – Мат-лы Междунар. конф. “Современные проблемы сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии (к 100-летию академика Г.И. Мавлянова)” – Ташкент: ИС АН РУз, 2010. С. 241–244.
20. Якубов Д.Х. Геотектонические условия возникновения сильных землетрясений Среднего и Южного Тянь-Шаня. – Под ред. О.М. Борисова – Ташкент: ФАН, 1991. 104 с.
21. Якубов Д.Х., Ахмеджанов М.А., Борисов О.М. Региональные разломы Среднего и Южного Тянь-Шаня. – Под ред. Г.А. Мавлянова – Ташкент: ФАН, 1976. 146 с.

22. Ярмухамедов А.Р. Современные тектонические движения земной коры. — В кн. *Геология и полезные ископаемые Республики Узбекистан*. — Под ред. О.М. Борисова — Ташкент: Университет, 1998. С. 446–459.
23. Atabekov I. Earth Crust's stresses variation in Central Asian earthquake's region // *Geodes. Geodynam.* 2020. Vol. 11. Is. 4. P. 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.12.005>
24. Brookfield M.E. Geological development and Phanerozoic crustal accretion in the western segment of the southern Tien Shan (Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan) // *Tectonophysics.* 2000. Vol. 328. P. 1–14.
25. De Grave J., Glorie S., Ryabinin A., Zhimulev F., Buslov M.M., Izmer A., Elburg M., Vanhaecke F., Van den Haute P. Late Palaeozoic and Meso-Cenozoic tectonic evolution of the Southern Kyrgyz Tien Shan: Constraints from multi-method thermochronology in the Trans-Alai, Turkestan-Alai Section and the South-eastern Ferghana Basin // *J. Asian Earth Sci.* 2011. Vol. 44. P. 149–168. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.04.019>
26. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.L., Zoback M. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // *Tectonophysics.* 2018. Vol. 744. P. 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
27. Glorie S., De Grave J., Buslov M.M., Zhimulev F.I., Stockli D.F., Batalev V.Y., Izmer A., P. Van den Haute, Vanhaecke F., Elburg M.A. Tectonic history of the Kyrgyz South Tien Shan (Atbashi–Inylchek) suture zone: The role of inherited structures during deformation-propagation // *Tectonics.* 2011. Vol. 30. TC6016. <https://doi.org/10.1029/2011TC002949>
28. Mordvintsev D., Barrier E., Brunet M-F., Blanpied C., Sidorova I. Structure and evolution of the Bukhara-Khiva region during the Mesozoic: the northern margin of the Amu-Darya Basin (southern Uzbekistan). — In *Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range*. — Ed. by M.-F. Brunet, T. McCann, E.R. Sobel, (Geol. Soc. London, Spec. Publ. 2017. Vol. 427. Is. 1). P. 145–174. <https://doi.org/10.1144/SP427.16>
29. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Sycheva N.A., Tatevossian R.A. Development of inversion methods on fault slip data stress state in orogenes of Central Asia // *Tectonophysics.* 2012. Vol. 581. P. 114–131.
30. Rolland Y., Alexeiev D.V., Kröner A., Corsini M., Loury C., Monié P. Late Palaeozoic to Mesozoic kinematic history of Talas-Ferghana strike-slip Fault (Kyrgyz West Tianshan) revealed by a structural study and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating // *J. Asian Earth Sci.* 2013. Vol. 67–68. P. 76–92.
31. Thomas J.C., Cobbold P.R., Shein V.S., Le Douaran S. Sedimentary record of late Paleozoic to Recent tectonism in central Asia — analysis of subsurface data from the Turan and south Kazak domains // *Tectonophysics.* 1999. Vol. 313. P. 243–263.
32. Zoback M.L. First and Second Modern Pattern of Stresses in the Lithosphere: The World stress Map project // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. No. B8. P. 11 707–11 728.
33. Zoback M.L., Zoback M. Lithosphere stress and deformation // *Treat. Geophys.* 2007. P. 255–271. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53802-4.00115-9>
34. Zubovich F.V., Wang X., Scherba Y.G., Schelochkov G.G., Reilinger R., Reigber C., Mosienko O.I., Molnar P., Michajljow W., Makarov V.I., Li J., Kuzikov S.I., Herring T.A., Hamburger M.V., Hager B.X., Dang Y., Bragin V.D., Beisenbaev R. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions // *Tectonics.* 2010. Vol. 29 (TC6014). P. 1–23.
35. Surfer software, <https://www.goldensoftware.com/> (Accessed February 2, 2022).

Stress Regime of the Earth's Crust in the Western Tien Shan in Central Asia (Uzbekistan): A Mathematical Model of Stresses

I. U. Atabekov^{a,*}, Yu. M. Sadykov^a

^a*Mavlyanov Institute of Seismology, Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan, bld. 3, st. Zulfiyakhanum, 100028 Tashkent, Uzbekistan*

**e-mail: atabekovi@mail.ru*

Analysis of seismic and tectonic processes carried out, taking into account the size of tectonic structures and geological factors that determine the features of the relationship between tectonic units of different ranks, made it possible to identify patterns in the development of a seismic process to predict seismic activation. Modern tectonic movements reflect the folded-block nature of the structure of the earth's crust. In our study, based on the Stokes equations, we solve the problem of the stress state of the earth's crust in the Western Tien Shan region, taking into account active faults of different ranks. Grouping the direction of displacement velocities obtained as a result of a numerical solution made it possible to divide the region of the Western Tien Shan into separate blocks, the boundaries of which coincide with the existing faults of a higher rank. The numerical results of the model are verified with geodetic and GPS data. The most intense areas of the Western Tien Shan region are compared with macroseismic data.

Keywords: Neotectonics, recent tectonic movements, numerical model, crustal stress, Fergana depression, Western Tien Shan

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛ “ГЕОТЕКТОНИКА”(GEOTECTONICS)

DOI: 10.31857/S0016853X22030110

Выполнение авторами статьи изложенных ниже требований к рукописи обязательно. Рукопись, не соответствующую этим требованиям, редакция журнала вынуждена возвращать авторам.

1. Общие требования

1.1. Статья должна быть представлена на русском языке. Журнал публикует также статьи, полученные на английском языке.

1.2. Рукопись статьи должна быть представлена в электронном виде в Word файле, который должен содержать текст, список литературы, таблицы (если имеются), подписи к рисункам и пронумерованные рисунки JPEG. Необходимо сформировать дополнительную папку с рисунками в JPEG файлах (1 рисунок = 1 JPEG файл; рисунок, состоящий из фрагментов (а), (б) и т.д., следует разместить в одном JPEG файле) и дополнительную папку с рисунками в файлах JPEG архивировать в ZIP, также необходимо сформировать дополнительную папку с таблицами в Word файлах (1 таблица = 1 Word файл) и архивировать дополнительную папку с таблицами в ZIP. Сформированный Word файл рукописи и дополнительные папки с рисунками и таблицами, архивированные в ZIP, автор-корреспондент направляет в редакцию.

1.3. Титульная страница статьи должна содержать элементы в следующей последовательности в Word файле: название статьи, инициалы и фамилии авторов, аффилиация авторов, адрес электронной почты автора-корреспондента. Статья должна содержать рубрики в следующей последовательности:

- * Аннотация (не менее 150 и не более 300 слов).
- * Ключевые слова: 8–12 слов и/или словосочетаний.
- * Введение, в котором необходимо указать цель исследования. Во Введении уместны исторические сведения.
- * Геологический очерк с описанием региона исследования.
- * Описание метода исследования (если он нестандартен) и фактического материала.

* Основная часть, в которой необходимо разбить описание на подробные рубрики и снабдить их подзаголовками.

- * Результаты исследования.
- * Обсуждение результатов.
- * Заключение, или пронумерованные Выводы.
- * Благодарности.
- * Финансирование.
- * Список литературы.
- * Авторский перевод титула статьи, который включает название статьи, имена авторов, аффилиацию авторов, аннотацию, ключевые слова.

* Таблицы.

* Подписи к рисункам, составленные от общего названия рисунка и далее – описания фрагментов рисунка, например, (а), (б), к обозначениям в виде сокращений и аббревиатур, раскрытие условных обозначений к рисунку завершает подпись.

* Пронумерованные рисунки.

1.4. В статье должны быть мелкомасштабная географическая карта с обозначенными объектами (например, *КАСПИЙСКОЕ МОРЕ*, п-ов Камчатка, и т.п.), на которой показано положение района исследований, и обзорная карта района исследований, на которой показаны исследуемые геологические объекты, структуры. На всех рисунках (картах, профилях, зарисовках) должны быть указаны линейный масштаб и ориентировка; на картах обязательно указать градусную сетку (поставить цифры градусов и риски к ним снаружи рисунка), широту и долготу.

1.5. На картах и рисунках необходимо обозначить упоминаемые в тексте географические и геологические объекты, тектонические структуры, зоны, пункты. Не следует перегружать рисунки ненужными названиями.

1.6. При использовании стратиграфических подразделений, которые не находятся в международной стратиграфической шкале (свит, серий, горизонтов и др.), необходимо указывать их возраст (абсолютный или относительно подразделений международной шкалы) при первом упоминании в тексте или таблице, стратиграфической колонке.

2. Требования к рукописи

2.1. Размер представляемой статьи не должен превышать 36 страниц, которые включают текст, список литературы, подписи к рисункам.

2.2. Текст рукописи должен быть отпечатан через 2 интервала шрифтом Times New Roman размером 12 pt; форматирование по левому полю. Список литературы и подписи к рисункам печатать через 2 интервала с новой страницы, таблицы необходимо разместить после списка литературы. Все страницы должны быть пронумерованы.

2.3. Первая (титовая) страница статьи должна быть оформлена по следующему образцу: индекс статьи по системе Универсальной десятичной классификации (УДК); название статьи; инициалы и фамилии авторов статьи; полное название учреждений, в которых проводилось исследование, их почтовый адрес с индексом; электронный адрес автора-корреспондента.

2.4. Иностранные фамилии, а также названия зарубежных географических пунктов в тексте приводятся в русской транскрипции.

2.5. Все аббревиатуры и сокращения (за исключением общеупотребительных) должны быть раскрыты при первом их упоминании.

2.6. В статье должны использоваться физические единицы и обозначения, принятые в Международной системе единиц СИ.

2.7. Библиографические ссылки размещаются в тексте в формальном порядке следующим образом: в квадратных скобках указывается номер, который этот литературный источник имеет в алфавитном списке литературы, помещаемом в конце предложения.

2.8. Размер иллюстраций в записи должен быть не менее 9 × 7 см и не более 18 × 24 см.

2.9. Рисунки предоставляются в файлах в формате JPEG с разрешением не менее 300 точек на дюйм, каждый рисунок — в отдельном файле.

2.10. Фотографии предоставляются также в файлах в формате JPEG.

2.11. Место размещения иллюстраций и таблиц указывается в тексте в круглых скобках: первое упоминание рисунка (рис. 1), таблицы (табл. 1), все последующие упоминания — (см. рис. 1) и (см. табл. 1). Первое упоминание рисунка, таблицы автор выделяет зеленым цветом. Статья может сопровождаться дополнительными материалами в Приложении к статье, в котором авторы могут разместить таблицы, карты, разрезы. Приложение упоминается в статье в круглых скобках.

2.12. Требование к оформлению списка литературы.

* Литература, на которую имеются ссылки в тексте, таблицах, рисунках, приводится в конце статьи под заголовком СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

* Список литературы составляется по алфавиту: сначала — русскому, затем — латинскому. Ссылки нумеруются сплошной нумерацией. Количество ссылок в статье должно быть не более 100. Под одним номером размещается ссылка на одну работу.

* Все ссылки даются на языке оригинала. Названия на японском, китайском и других иностранных языках, использующих не латинский шрифт, пишутся в латинской транслитерации.

* Ссылки на статьи в журналах должны содержать следующую информацию: Фамилии и инициалы всех авторов (курсивом). Название статьи. Название журнала. год. том. номер журнала. страницы, *примеры*: Белов Б.Б. Тектоника Кавказа // Геотектоника. 2001. № 2. С. 17–31.

или

Smith S.S. Tectonics of Japan // Tectonophysics. 1997. Vol. 276. P. 139–161.

* Ссылки на статьи в сборниках (статей, докладов, тезисов и др.) должны содержать следующую информацию: Фамилии и инициалы авторов (курсивом), Название работы, Название сборника, Инициалы и фамилии редакторов, Издательство, год, том, номера страниц, *примеры*:

Белов Б.Б. Вулканизм Южного Урала. — В сб.: *Геология Урала*. — Под ред. И.И. Иванова — М.: Наука, 2002. С. 73–85.

или

Smith S.S. Ophiolites of Asia, In: *Ophiolites*, Ed. by A.A. Brown, (Cambridge, Camb. Press, UK, 2005), P. 599–614.

* Ссылка на сборник целиком начинается с его названия, затем указываются ответственный редактор сборника и выходные данные, *пример*:

Геология Урала. — Под ред. И.И. Иванова — СПб.: Наука, 2005. 711 с.

* Ссылки на книги должны содержать следующую информацию: Фамилии и инициалы авторов (курсивом), Название книги, Город, Издательство, год, том, количество страниц, *пример*:

Жеваго В.С. Геотермия и термальные воды Казахстана. — М.: Наука, 1972. 253 с.

2.13. К рукописи необходимо приложить файл Word, который должен содержать:

* Расшифровку аббревиатур, как русских, так и иноязычных.

* В латинской транскрипции: фамилии всех авторов статьи, адреса всех иностранных авторов, названия иностранных геологических объектов (разломов, террейнов, массивов и т.п.), малоизвестные иностранные географические названия.

* Желательный автору статьи перевод терминов на английский язык.

* На русском языке, в именительном падеже: географические названия, по которым названы местные стратиграфические объекты (*например*:

Тундровка – тундровская свита, Иваново – Ивановский разлом).

* Сведения об авторе-корреспонденте статьи, с которым редакция будет поддерживать связь: фамилию, имя и отчество, почтовый адрес с индексом, номера телефонов и электронный адрес (e.mail).

3. Требования к электронной версии статьи

3.1. Файлы должны быть протестированы автором на отсутствие вирусов.

3.2. В состав электронной версии статьи должны входить:

3.2.1. Файл в формате программы Microsoft Word, сформированный в соответствии с п. 1.2.

3.2.2. Файлы таблиц в формате программы Microsoft Word (1 таблица = 1 файл) в ZIP-archive.

3.2.3. Файлы иллюстраций (1 рисунок = 1 файл) в ZIP-archive:

* векторные рисунки должны быть в программах Corel Draw, Adobe Illustrator или в формате JPEG;

* для растровых рисунков использовать формат JPEG или TIF с разрешением 300 dpi, 256 оттенков серого цвета;

3.2.4. Файл в формате Word, который создан из всех файлов, перечисленных в пунктах 1.2, 3.2.1., 3.2.2. и 3.2.3., и содержит: текст статьи, список литературы, авторский перевод на английский язык титула статьи, таблицы, подписи к рисункам, все иллюстрации, автор-корреспондент направляет в редакцию.

3.2.5. Файл “Readme” в формате программы Microsoft Word, содержащий: а) название журнала, фамилии и инициалы авторов, название статьи,

б) опись всех файлов с их расширениями указанием версий использованных программ (*например*, A. Illustrator CS3).

4. Прохождение рукописи статьи в редакции журнала

Поступившая в редакцию статья проверяется на соответствие изложенным выше требованиям к рукописи и направляется на рецензии. После рецензирования редакция направляет автору-корреспонденту редакционный Word файл статьи для внесения исправлений в соответствии с комментариями рецензентов. Исправленная авторами статья повторно рецензируется и, затем, обсуждается Редколлегией журнала, которая принимает статью к печати или отклоняет ее. Рукописи отклоненных статей редакция не возвращает. Принятые к публикации статьи проходят редактирование. Редакция высылает автору-корреспонденту отредактированный редакционный авторский оригинал статьи в Word файле на согласование. Дальнейшее воспроизведение редакционного авторского оригинала статьи контролируется редакцией. Перевод статьи на английский язык производит Pleiades Publishing, Ltd. Файлы PDF опубликованной статьи на русском и английском языках направляются на указанную в п.2.4 электронную почту автора-корреспондента.