

УДК 551.248.2: 470.62 / .67

В.А. Зайцев¹, А.А. Златопольский², Л.В. Панина³

СОВРЕМЕННЫЙ РЕЛЬЕФ СКИФСКОЙ ПЛИТЫ КАК ОТРАЖЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ФУНДАМЕНТА

В статье описано тектонофизическое моделирование деформаций фундамента Скифской плиты. Приведены оценки величины деформации и ориентировки поля напряжений, полученные в результате моделирования. Выполнено сопоставление этих параметров с морфо-структурными характеристиками рельефа дневной поверхности, рассчитанных по методике LESSA. Рассмотрены некоторые параметры современной геодинамики Скифской плиты, такие как сейсмичность и тепловой поток. Обнаруженное соответствие позволяет говорить о значимой роли деформации фундамента в формировании современного рельефа, а также дает возможность использовать характеристики рельефа для изучения глубинного строения платформенных территорий.

Ключевые слова: тектонофизическое моделирование, современная геодинамика, ориентационные характеристики рельефа.

The tectonophysical modeling deformation of the Scythian plate basement is described in the article. The estimates of the amount of deformation and the orientation of the stress fields resulting from the modeling are given in the article. The comparison of these parameters with morphostructural characteristics of the surface topography, calculated by LESSA methodology performed. In addition, some parameters of the Scythian plate modern geodynamics, such as seismicity and heat flow have been considered. The observed conformity suggests a significant role of the basement deformation in the modern relief formation, but also allows the use of the relief characteristics for the study of the deep structure of platform areas.

Key words: tectonophysical modeling, modern geodynamics, the orientation characteristics of the relief.

Введение. С целью выяснения влияния деформаций фундамента Скифской плиты на формирование новейших структур проведены тектонофизическое моделирование и структурно-геоморфологические исследования, дополненные анализом рельефа дневной поверхности, выполненным с помощью программы LESSA. Традиционно исследователи пытаются найти прямое отражение геологических структур в рельефе. Наши работы показали, что целесообразнее исследовать не отдельные формы рельефа, а его рисунок, точнее статистику присутствия в рельефе линейных элементов разного направления. Подчеркнем, что в рельефе находят отражение не только структуры, но и деформационные параметры тектонического процесса (скорость и величина деформации, ориентировка осей напряжений).

Тектонофизическое моделирование. Остановимся кратко на общих принципах тектонофизического моделирования. Экспериментальное воспроизведение в лабораторных условиях природных ситуаций и тектонических особенностей геологических объектов ограничено рядом факторов, среди которых не только различие свойств модельных материалов и естественных пород, величины и способов нагружения,

скорости деформации, но самое главное — время релаксации напряжений. Для преодоления этого в тектонофизическом моделировании принято использовать коэффициенты подобия, которые, однако, не снимают проблему полностью из-за того, что геологи не всегда точно знают природные параметры деформационных процессов. Именно поэтому все чаще экспериментаторы обращаются к так называемому аналоговому тектоническому моделированию. В отличие от тектонофизического, воспроизводящего формальные условия физического подобия реологических свойств, времени и скорости деформаций природных и экспериментальных материалов, тектоническое моделирование позволяет оценивать деформационный процесс на качественно кинематическом уровне. Наиболее выигрышная сторона этого подхода — возможность воспроизведения конкретных тектонических структур, в том числе регионального ранга, и наблюдения за кинематикой движений, зарождением и формированием важнейших составных элементов структуры по мере развития деформации. Как показывает опыт, здесь определяющую роль играет характер нагружения экспериментального образца, который задается исходя из известных или предпо-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, вед. науч. с.; *e-mail:* v.zaitsev@mail.ru

² ИКИ РАН, ст. науч. с., канд. техн. н.; *e-mail:* aazlat@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. геол.-минер. н.; *e-mail:* panina53@mail.ru

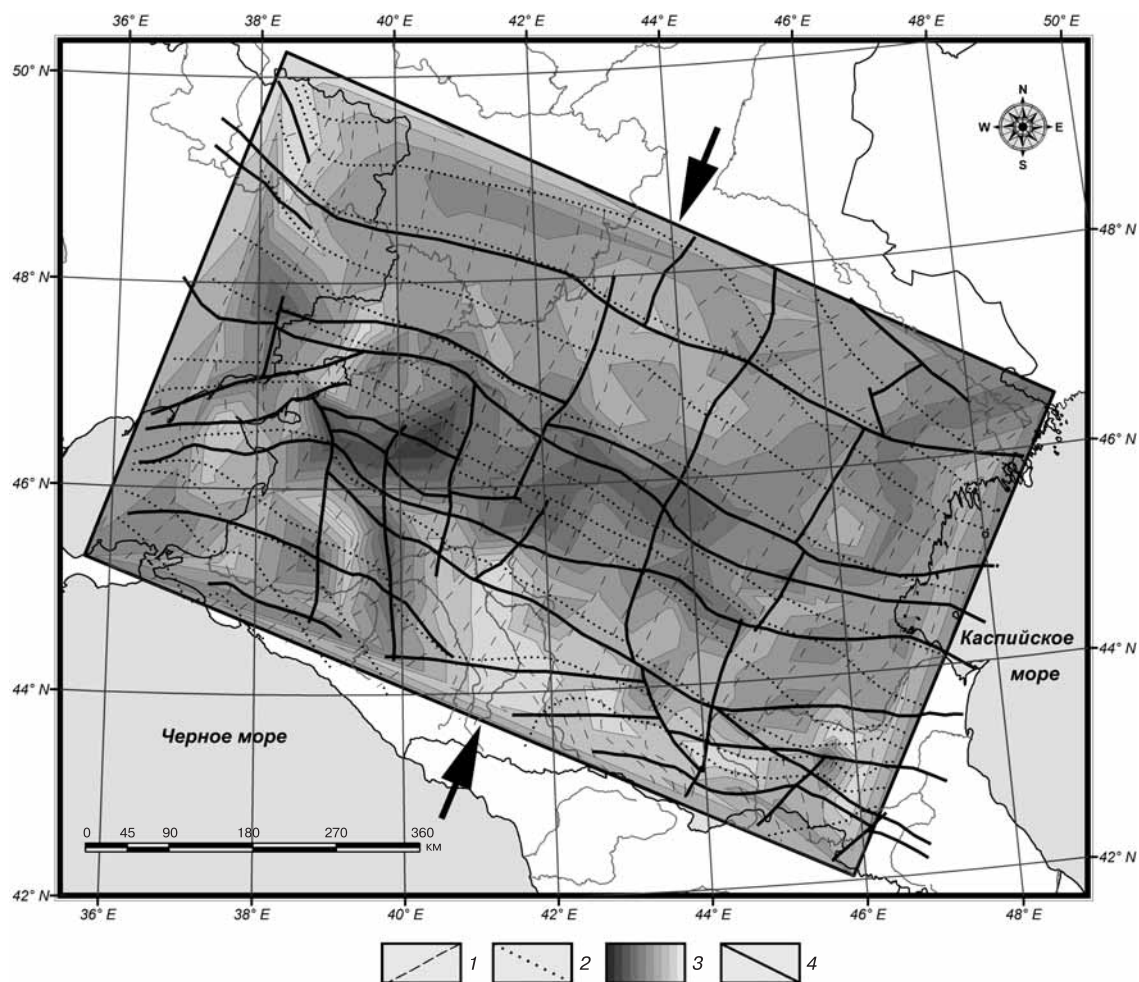


Рис. 1. Карта величины деформации фундамента Скифской плиты: 1 — ориентировка осей сжатия, 2 — ориентировка осей растяжения, 3 — величина деформации (от 0 до 50%), 4 — разломы фундамента

лагаемых геодинамических обстановок для конкретного природного геологического объекта или для определенной геомеханической ситуации. При этом подбирается или изменяется условный тип поведения материала — вязкопластичный, хрупкопластичный, хрупкий, упругий. Существенно то, что по аналогии с природной ситуацией в модели изначально можно задать крупнейшие неоднородности в виде «нарезки» на блоки разной конфигурации, ориентировки, размера и реологических свойств (плотность, вязкость, упругость) [Белоусов, Гончаров, 1991]. После деформации оценивают возникающий структурный рисунок, характер и пространственное положение отдельных структурных элементов, кинематика движений и сравнивают их с соответствующими природными данными. Это дает некоторые ориентиры для более правильного понимания и интерпретации природных структур и приближает к пониманию роли внешней нагрузки, исходной структурированности объема и картины распределения напряжений в нем.

Для выяснения величины и ориентировки деформаций блоков фундамента Скифской плиты выполнено тектонофизическое моделирование, которое заключалось в серии экспериментов на эквивалентных материалах, структура которых близка или аналогична

природному объекту. За основу взята модель из глины (32×20×4 см), имитировавшая фундамент Скифской плиты, нарушенный протяженными зонами разломов, установленными ранее геолого-геофизическими методами. Нанесение кругов — реперов с сантиметровым диаметром — на границы блоков «фундамента» и на межблоковые узлы либо равномерно по поверхности (в среднем через 2 см) позволило в дальнейшем проследить поведение отличающихся по размеру и конфигурации блоков фундамента в условиях внешнего нагружения, т.е. двухстороннего сжатия в направлении север—северо-восток—юг—юго-запад (поперечного к простиранию Кавказа). Максимальное сокращение модели составило 15% от первоначального поперечного размера (рис. 1). Процесс деформации и его результаты поэтапно фиксировали цифровой фотокамерой, а затем обрабатывали с помощью редактора компьютерной графики и в геоинформационной системе ArcMap. Отметим, что в модель вошли территории, обрамляющие Скифскую плиту: восточное окончание Украинского щита, юго-восточное окончание Донбасса, кряж Карпинского и Предкавказский передовой прогиб.

В результате моделирования в исходной разрывно-блоковой структуре активизировались направления,

по которым произошли сдвиговые смещения разных амплитуды и знака. Амплитуды смещения составляли несколько миллиметров и изменялись на небольшом расстоянии — от 0,5 до 4 мм. Наряду с участками разломов, где наблюдались движения по ним, были обнаружены направления и зоны, находившиеся в компрессионном состоянии без существенных перемещений. Присутствовали и так называемые закрытые для деформации участки, где не произошло заметного изменения формы исходно круглого маркера. Изменение ориентировок осей эллипсоида деформации указывает на вращение блоков против или по часовой стрелке в зависимости от их формы, положения в общей структуре и простираения внешних границ, находившихся в разных условиях нагружения. Это указывает на дифференцированный характер движения блоков и неоднородность проявления активизации среды при внешнем нагружении объема. При этом можно выделить динамически активные направления и узлы в разрывно-блоковой структуре и области, почти не затронутые деформацией, участки, находящиеся в компрессионном состоянии, а также зоны явного растяжения или декомпрессии.

Таким образом, моделирование позволило выявить подвижки по зонам разломов фундамента, ограничивающие крупные блоки, как правило, со сдвиговой компонентой. При этом амплитуда и направление движений изменяются вдоль разломов, затухая на отдельных участках. В целом северо-северо-западные разломы имеют правосдвиговую составляющую, север-северо-восточные — левосдвиговую, в субкавказских зонах разломов сдвиговая составляющая выражена хуже. Определение осей напряжений показало, что оси сжатия имеют субмеридиональное направление, а растяжения — субширотное. Вместе с тем изменяют направление траектории осей, особенно на западе и востоке района, повторяя конфигурацию Кавказского орогена. Это обстоятельство может указывать на то, что Скифская плита, а точнее ее блоковая делимость, определяет конфигурацию орогена Большого Кавказа. Сравнение новейшего структурного плана и фундамента показало, что новейшие дислокации во многом наследуют главным образом крупные положительные структурные элементы фундамента — своды, валы, выступы фундамента, существенно разросшиеся к современной эпохе, что отражено на карте неотектоники [Панина, 2009]. В то же время впадины фундамента существенно сократились в размерах и «заросли» частными поднятиями. Наследуются и крупные разломы фундамента: Ахтырский, Владикавказский, Манычский. Большая часть разломов фундамента отражена в новейших структурах лишь на отдельных участках.

Обращают на себя внимание неодинаковый характер и величина деформаций фундамента в блоках. Наиболее деформированной оказалась область субкавказского простираения в центральной части

Скифской плиты. Она включает Ростовский выступ на западе, северную часть района Ставропольского свода центрального сегмента Скифской плиты, Прикумско-Тюленевский вал, Маныч-Гудилковский прогиб, восточную часть вала Карпинского и Астраханский выступ на юго-востоке Прикаспийской впадины.

Сравнение результатов моделирования с современной геодинамикой. Выявленные закономерности деформации фундамента Скифской плиты сравнивались с проявлениями современной геодинамики. Геодинамическая активность выявленной зоны максимальных деформаций фундамента подчеркнута и приуроченностью эпицентров землетрясений к наиболее протяженным зонам разрывов, нарушающим ее. Среди них Армавирская зона разрывов, зарождающаяся в области горно-складчатого сооружения Большого Кавказа, следующая субмеридионально и пересекающая практически все структуры Скифской плиты до Цимлянского водохранилища. В северной части Ставропольского поднятия на эту зону проецируется эпицентр сейсмического события 1969 г., которое оценивается магнитудой до 9,9. Восточнее к параллельной Калаусской зоне тяготеют землетрясения 1999 и 2006 гг. с магнитудой 4,1 и 4,4 соответственно. Сейсмически активны и зоны разрывов субширотного (запад-северо-западного простираения): Армави́ро-Невинномысская, Южно-Манычская, Акшибай-Ергенинская. Магнитуда здесь колеблется от 3,9 в Терско-Каспийском прогибе и 4,6 на северо-западной периклинали Ставропольского поднятия до 9,9 на восточной границе Сальско-Ергенинского поднятия. Решения фокальных механизмов также близки по ориентировке с осями сжатия и растяжения, полученными при моделировании.

Косвенное доказательство роста новейших поднятий в геодинамически активной зоне — максимальные значения плотности линеаментов разных направлений, отдешифрованных на космических снимках Landsat-ETM. Для количественной оценки распространения линеаментов подсчитана плотность (густота) линеаментов ($\text{м}/\text{км}^2$) в скользящем окне 115 км. Отметим согласованность областей максимальных значений деформации и максимальных значений плотности линеаментов (рис. 2).

Максимальные значения плотности линеаментов приурочены на западе к Крыловскому, Батайскому и Выселковскому новейшим поднятиям. Повышенными значениями плотности линеаментов характеризуется также северная область Ставропольского поднятия, восточная часть Прикумского (Прикумско-Тюленевского вала), а также южный склон Сальско-Ергенинского новейшего поднятия (восточная часть вала Карпинского). Таким образом, наблюдается явное соответствие максимумов плотности линеаментов и растущих новейших поднятий, сосредоточенных в геодинамически активной зоне фундамента, выявленной тектонофизическим моделированием.

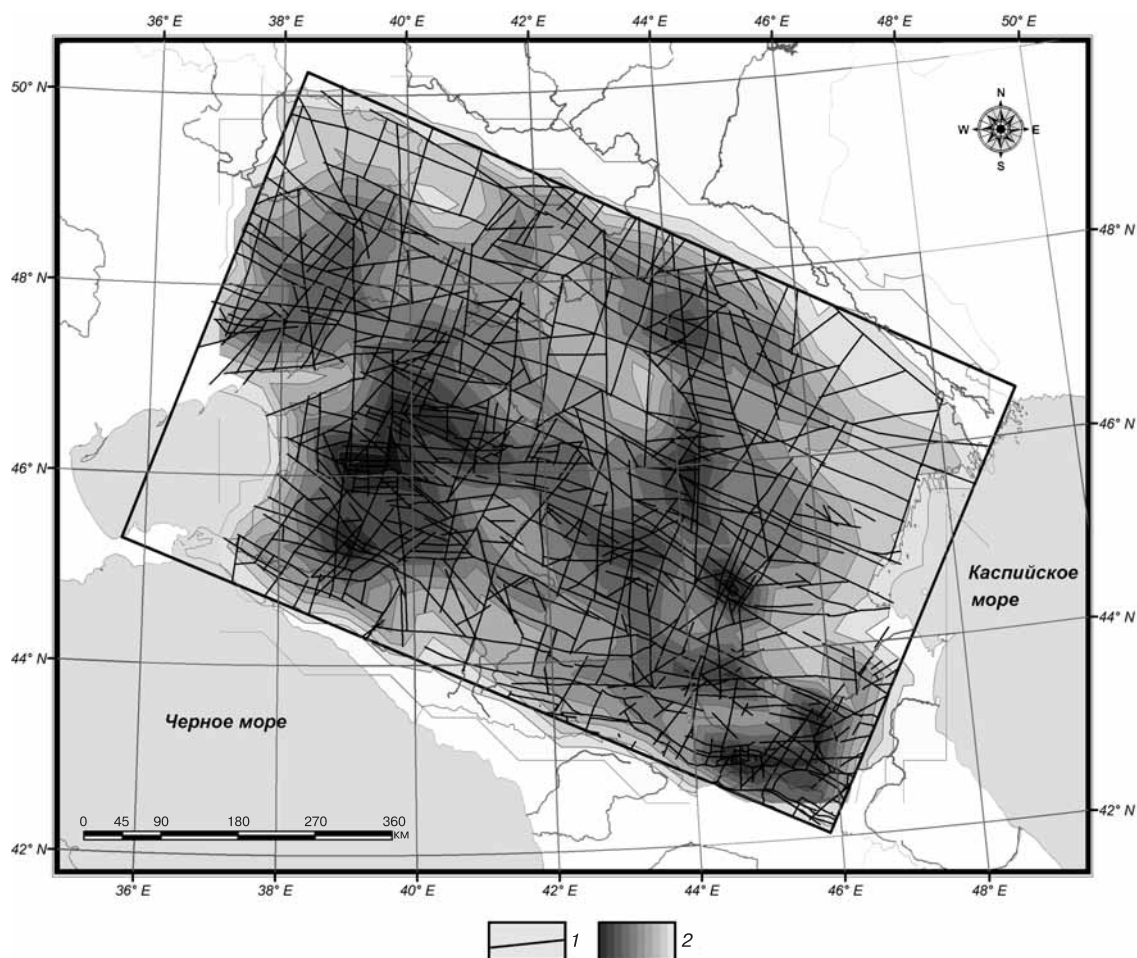


Рис. 2. Схема визуального дешифрирования Скифской плиты: 1 — линеаменты, 2 — плотность линеаментов

Сопоставление результатов моделирования с характеристиками рельефа. Направление поля напряжения и локальную степень сжатия, полученные при моделировании, сравнивали с ориентационными характеристиками рельефа, которые рассчитаны с помощью программы LESSA по данным SRTM [Златопольский, 1988]. Рассмотрена площадь с размерами 995×1260 км, с разрешением 90 м/пикс. Автоматически выявлены линии хребтов, долин (условно назовем их штрихи), рассчитана их статистика в скользящем окне — общая плотность штрихов, плотность штрихов каждого направления, розы-диаграммы распределения штрихов по направлениям, степень и направление вытянутости роз-диаграмм, линии вытянутости, которые показывают, как изменяется направление вытянутости роз-диаграмм по территории и др. Новые возможности технологии LESSA для анализа цифровой модели рельефа Скифской плиты подробно изложены в статье А.А. Златопольского [Златопольский, 2011].

Схема поля напряжения фундамента сопоставлена с картами ориентировки и величины вытянутости роз-диаграмм рельефа дневной поверхности (рис. 3).

Для получения характеристик рельефа необходимо установить параметры анализа — масштаб штрихов и размер скользящего окна. Эксперименты показали, что отбраковка «хребтов» и коротких штрихов в об-

ласти Скифской плиты мало влияет на вытянутость роз-диаграмм (хотя существенно меняет плотность штрихов), поэтому были использованы все штрихи.

Учитывая фактическую детальность модели (шаг измерений в модели), размер окна для расчета роз-диаграмм должен быть больше 40×60 км, в то же время в соответствии с размерами анализируемой территории окно должно быть меньше 250 км.

Ориентационные характеристики штрихов разного масштаба могут различаться кардинально. Это естественно, так как в одном случае измеряется направление реки (или хребта), а при более крупном масштабе — притоков (или отрогов) совершенно иного направления. Изменение масштаба анализируемых штрихов осуществлялось путем изменения разрешения. Размер области исследования и исходное разрешение позволили рассматривать масштаб, отличающийся в 30 раз, размер самого маленького штриха при этом ориентировочно изменяли от 0,55 до 16,25 км (разрешение от 92 до 2700 м/пикс). В этом диапазоне масштаба в областях, расположенных за пределами Скифской плиты, направление штрихов изменилось практически везде. Как правило, оно изменялось один раз и на ортогональное направление (в некоторых местах оно изменилось 2 и даже 3 раза), но на Скифской плите направление вытянутости роз-

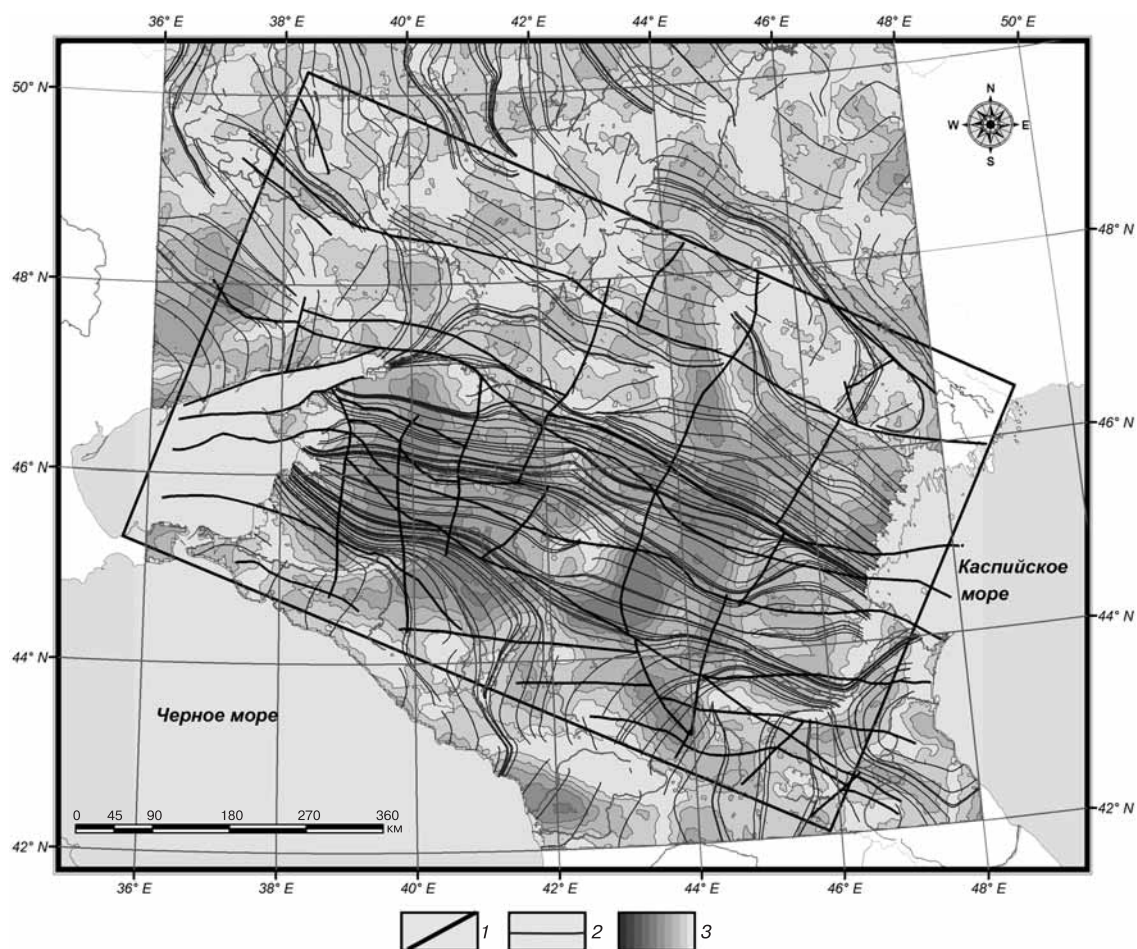


Рис. 3. Схема результатов обработки цифровой модели рельефа дневной поверхности с помощью программы LESSA: 1 — разломы фундамента, 2 — линии вытянутости роз-диаграмм, 3 — степень вытянутости роз-диаграмм

диаграмм либо не менялось (примерно на половине территории), либо менялось меньше чем на 45°.

В результате масштаб и окно анализа (в указанных диапазонах) определялись из сравнения характеристик рельефа с результатами моделирования, т.е. выявлялось их максимальное сходство. Сходство модели оценивали только на качественном уровне.

Картину осей растяжения фундамента, вытянутых в «кавказском» (запад–северо-западном) направлении, сравнивали с линиями вытянутости рельефа. При этом штрихи элементов рельефа рассчитаны для окна осреднения 135×135 км. Максимальная корреляция этих параметров наблюдалась при масштабе, соответствующем разрешению 0,9 км/пикс. При уменьшении масштаба цифровой модели рельефа поверхности линии вытянутости становятся субширотными, а при увеличении масштаба в линиях вытянутости все больше проявляется меридиональное направление. Особенно это характерно для севера исследуемой территории.

Модификация окна расчета от 60 до 230 км не привела к существенному изменению ориентировки линий вытянутости.

Картина степени сжатия разнообразнее. Выделены два основных максимума степени вытянутости роз-диаграмм в центре Скифской плиты (рис. 3), что

в целом совпадает с тектонофизической моделью, на которой также присутствуют два основных максимума. Изменение параметров анализа рельефа не меняет общую картину. Наиболее высокая степень корреляции наблюдается при следующих параметрах расчета — разрешение 1,2 км/пикс и размеры скользящего окна 115×115 км.

Сходная в целом картина линий вытянутости и степени вытянутости в зоне Скифской плиты для элементов рельефа разного масштаба свидетельствует о надежности результатов исследований.

Заключение. Сопоставление результатов тектонофизического моделирования деформации фундамента с характеристиками рельефа дневной поверхности Скифской плиты показало высокую степень корреляции между ними. Статистические параметры линейных форм рельефа (ориентировка линий вытянутости роз-диаграмм, степень вытянутости, плотность линеаментов) соответствуют полю напряжений фундамента. Это обстоятельство, с одной стороны, является независимым подтверждением результатов тектонофизического моделирования, а с другой — увеличивает достоверность применения технологии измерения параметров рельефа (LESSA).

Проведенные авторами исследования показали, что в рельефе отражаются не только геологические

структуры, но и геодинамические процессы, воздействующие на фундамент. Полученные результаты исследования находятся в соответствии с геолого-геофизическими данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белоусов В.В., Гончаров М.А. Автоматическое выполнение условий подобия в простейших случаях тектонического моделирования // Экспериментальная тектоника и полевая тектонофизика. Киев: Наукова думка, 1991. С. 16–20.

Зайцев В.А., Панина Л.В. Неотектоника и геодинамика Скифской плиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 1. С. 3–7.

Златопольский А.А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 38–46.

Таким образом, подтверждается целесообразность использования характеристик современного рельефа для изучения глубинного строения платформенных территорий.

Златопольский А.А. Пакет прикладных программ выделения и анализа линейных элементов аэрокосмических изображений // Автоматизированный линеаментный анализ при структурно-геологических и металлогенических исследованиях. М.: Недра, 1988. С. 14–28.

Панина Л.В. Новейший структурный рисунок Скифской плиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 1. С. 23–31.

Поступила в редакцию
28.05.2013