

УДК 910.3

А.О. Агибалов¹, В.А. Зайцев², А.А. Сенцов³, А.В. Полещук⁴, Е.А. Мануилова⁵

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЛЬЕФА И ЛОКАЛИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ ВОЛГО-УРАЛЬСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ

В работе описан сложный характер взаимосвязи между рельефом и нефтегазоносностью Волго-Уральской антеклизы. Проведенные нами геоморфологические исследования показали, что восточная часть этой структуры, в пределах которой расположено большое количество нефтяных и газовых месторождений, выделяется повышенными значениями следующих морфометрических параметров: 1) разность базисных поверхностей первого и второго порядков, построенных по методике В.П. Философова в масштабе 1:2 500 000; 2) длина водотоков второго порядка; 3) плотность водотоков первого порядка; 4) глубина вертикального расчленения; 5) крутизна склонов; 6) максимальная кривизна поверхности рельефа; 7) плотности линий вытянутости, построенных в программе А.А. Златопольского LESSA. Установлено, что медианные значения этих показателей в пределах месторождений превышают соответствующие величины, рассчитанные для всей территории Волго-Уральской антеклизы, а доверительные интервалы медиан не пересекаются. С помощью автоматизированного анализа цифровой модели рельефа выявлена общая закономерность ориентировок контуров линейно вытянутых месторождений углеводородов и простираний склонов: она заключается в преобладании двух главных направлений – северо-западного и северо-восточного – и объяснима активизацией диагональной системы планетарной трещиноватости. На наш взгляд, связь рельефа и нефтегазоносности обусловлена характером новейших тектонических движений, влияющих на облик рельефа и миграцию углеводородов. О значимости неотектонических движений как факторов рельефообразования свидетельствует установленная нами приуроченность эпицентров современных землетрясений к участкам, отличающимся повышенной горизонтальной и вертикальной расчлененностью рельефа. Методом компьютерного геодинамического моделирования в программе RMS 2013 компании Rohaг рассчитаны относительные амплитуды сжимающих напряжений, между величинами которых и коэффициентом суммарной эрозивной расчлененности рельефа существует численная корреляция (коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен 0,48). Она достигается в том случае, если в качестве внешней нагрузки задано широтное горизонтальное сжатие. Вероятно, указанный тип напряженного состояния проявляется в новейшее время и связан с влиянием горного сооружения Урала.

Ключевые слова: морфометрический анализ рельефа, нефтегазоносность, геодинамика

Введение. В настоящее время район Волго-Уральской антеклизы достаточно хорошо изучен в геолого-геоморфологическом отношении. Он находится на территории Северорусской и Среднерусской провинций Русской равнины. Северная часть антеклизы располагается на юго-востоке Двинско-Мезенской области, центральная и южная части – в пределах нескольких областей (перечислены с запада на восток): низменности Волжско-Окско-Донского междуречья, Приволжской возвышенности и Ергеней, Низкого и Высокого Заволжья [Щеглов, Громовик, 2017]. Основными макроформами рельефа Волго-Уральской антеклизы являются низменности со средними высотами более 100 м (Камско-Кельтминская, Марийская и другие низины) и возвышенности со средними высотами от 140–180 м

(Вятский Увал, Елабужская) до 300 м и более (Сыльвинский кряж и Артинское плато) [Мещеряков, 1972]. Восточнее антеклизы располагаются области развития низко-среднегорного рельефа Урала.

Особый интерес представляет восточная часть антеклизы, в пределах которой расположено большое количество месторождений нефти и газа – Ромашкинское, Арланское, Шкаповское, Оренбургское и др. В ряде работ, например [Горелов, 1972; Морозов и др., 2012], показано, что новейшие тектонические напряжения оказывают влияние на миграцию углеводородов (УВ) и, следовательно, на локализацию месторождений. В то же время неотектонические движения традиционно рассматриваются как один из факторов рельефообразования [Корчуганова, 2007]. В этой связи анализ рельефа Волго-Ураль-

¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, VII отделение: Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН, лаборатория методов прогноза землетрясений, ст. науч. с., канд. геол.-мин. н.; *e-mail:* Agibalo@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, зав. лабораторией исследования геокатастроф, канд. геол.-мин. н.; *e-mail:* v.zaitsev@mail.ru

³ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, VII отделение: Координационно-прогностический центр ИФЗ РАН, лаборатория методов прогноза землетрясений, науч. с.; *e-mail:* alekssencov@yandex.ru

⁴ Геологический институт РАН, отдел тектоники, лаборатория тектоники консолидированной коры, ст. науч. с., канд. геол.-мин. н.; *e-mail:* anton302@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, аспирант; *e-mail:* manuilovaeaterina139@gmail.com

ской антеклизы представляется актуальной и интересной задачей, имеющей не только научное, но и прикладное значение. Вопросы взаимосвязи рельефа и нефтегазоносности этой территории рассматривались разными исследователями. Так, практическая значимость метода В.П. Философова при поиске месторождений нефти и газа в пределах Волго-Уральской антеклизы отмечалась еще его основоположником [Философов, 1960]. В монографии С.К. Горелова [1972] показана приуроченность залежей УВ к крупным положительным морфоструктурам изометричной формы. Расчеты морфометрических параметров для ряда нефтегазоносных структур приведены в работе [Копылов, 2019]. Влияние активных разломов на локализацию зон поступлений УВ проанализировано в статье [Горюнов и др., 2015]. Приуроченность ряда месторождений к кольцевым структурам отмечена в публикации [Судариков, Калинина, 2015]. Оценка перспектив нефтеносности осадочных пород палеозоя по данным неотектонических исследований проводилась М.Н. Мингазовым [2004]. Признаки восполнения запасов УВ, обусловленные новейшими тектоническими движениями, описаны в статьях [Казанцев, Казанцева, 2008; Мингазов и др., 2012].

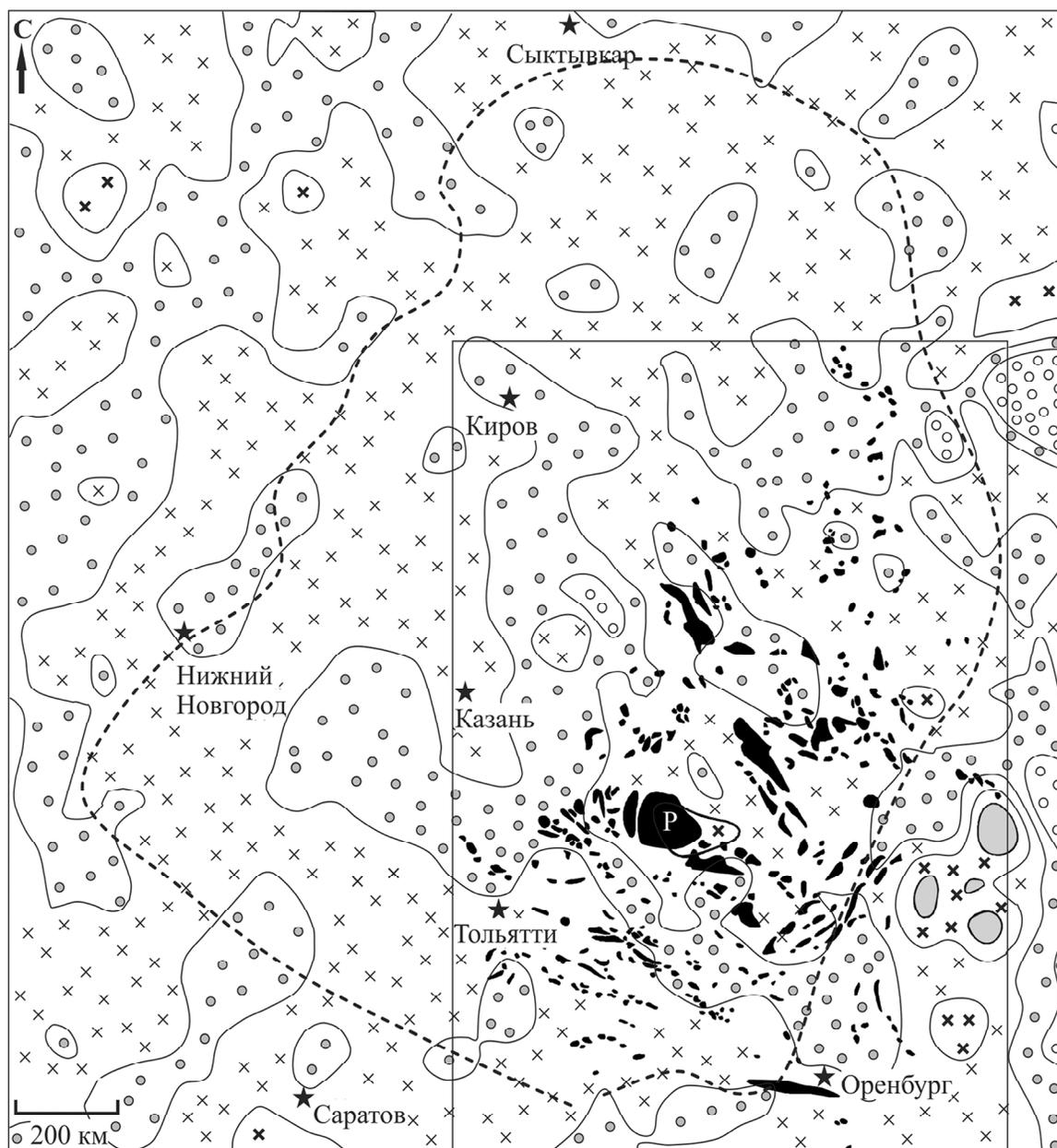
Проведенный нами морфометрический анализ рельефа позволил дополнить существующие представления о его связи с особенностями расположения месторождений нефти и газа. Новизна выполненных исследований заключается в том, что некоторые из рассмотренных нами морфометрических показателей (например, плотность линий вытянутости) не были изучены другими авторами. Кроме того, анализ взаимосвязи между рельефом и особенностями локализации месторождений УВ был выполнен на количественном уровне с использованием современных данных и средств их обработки.

Материалы и методы исследований. Исходными материалами для проведения морфометрического анализа являлась цифровая модель рельефа (ЦМР) разрешением 1 минута [Цифровая..., 2020], схема гидросети масштаба 1:2 500 000 [Цифровые..., 2020] и карта расположения месторождений УВ Волго-Уральской нефтегазоносной провинции [Лозин, 2002]. На основе этих данных проведены расчеты ряда морфометрических показателей рельефа, среди которых в качестве наиболее информативных были выбраны следующие: 1) разность базисных поверхностей первого и второго порядков; 2) длины водотоков второго порядка; 3) плотность водотоков первого порядка; 4) глубина вертикального расчленения; 5) крутизна склонов; 6) максимальная кривизна поверхности рельефа; 7) плотность линий вытянутости. Также нами была составлена схема коэффициента суммарной эрозионной расчлененности рельефа, рассматриваемого в качестве вспомогательного морфометрического показателя. Выбор перечисленных параметров связан с тем, что они опосредованным образом связаны с характером неотектонических движений.

Для расчета первых трех параметров по схеме гидросети было выделено шесть порядков речных долин. Долины, не принимавшие ни одного притока, рассматривались как долины первого порядка, долины второго порядка образовывались при слиянии двух долин первого порядка и т. д. Впадение долин более низкого порядка в долину более высокого порядка не изменяло порядок последней. Для того чтобы составить карту разности изобазит первого и второго порядков, были отмечены базисы эрозии, которым по ЦМР с помощью программы ArcGIS были присвоены значения высот. Затем была проведена интерполяция этих значений на всю рассматриваемую территорию и выполнено вычитание базисной поверхности второго порядка из поверхности первого порядка (рис. 1). Интерпретация построенной карты основана на том, что наибольшие превышения разности базисных поверхностей связаны с областями тектонических поднятий [Философов, 1960].

Одним из вспомогательных морфометрических методов является метод изолонг – линий равной протяженности водотоков определенного порядка. Методика построения схемы изолонг второго порядка (рис. 2) заключалась в том, что серединам соответствующих водотоков были присвоены значения их длин. Согласно [Применение..., 1970], направленность тектонических движений оказывает опосредованное влияние на характер распределения длин водотоков по территории.

Традиционно в практике морфометрических исследований проводят оценку горизонтальной и вертикальной расчлененности рельефа, определяют среднюю крутизну склонов [Симонов, 1999]. Как отмечено в работах [Голодовкин, 1966; Философов, 1967; Нетребин, 2012], эти показатели в ряде случаев отражают направленность неотектонических движений. Участки, отличающиеся более расчлененным рельефом, нередко располагаются в зонах новейших поднятий, могут быть приурочены к зонам повышенной проницаемости, нарушающим новейший структурный план. Для характеристики горизонтальной расчлененности используют коэффициент эрозионного расчленения, определяемого как отношение длин водотоков к единице площади. С помощью программы ArcGIS нами были составлены схемы плотности речных долин разных порядков, среди которых в качестве наиболее информативных выбраны схемы плотности рек первого и первого–шестого порядков. Для расчета глубины вертикального расчленения (J) по методике [Спиридонов, 1975] рассматриваемая территория была разделена на ячейки размерами 70×70 км, в пределах которых определялась разность высот $J = Z_{\max} - Z_{\min}$, где Z_{\max} и Z_{\min} – максимальная и минимальная высоты в ячейке (рис. 3). В пределах тех же расчетных ячеек вычислялись значения максимальной кривизны с помощью модуля Spatial Analyst программы ArcGIS по алгоритму [Zevenbergen, Thome, 1987], а также определялись значения безразмерного коэффициента суммарной эрозионной расчлененности рельефа (K) по формуле



Разности базисных поверхностей 1-го и 2-го порядков, м



Рис. 1. Схема разности базисных поверхностей первого и второго порядков Волго-Уральской антеклизы: 1 – нефтяные и газовые месторождения (по [Лозин, 2002]); 2 – границы Волго-Уральской антеклизы (по [Гаврилов, 1981]); 3 – контуры локального участка, изученного с большей детальностью; Р – Ромашкинское нефтяное месторождение

Fig. 1. Scheme of the difference between the basal surfaces of the 1st and 2nd orders within the Volga-Ural anticline: 1 – oil and gas fields (after: [Lozin, 2002]); 2 – the boundaries of the Volga-Ural anticline (after: [Gavrilov, 1981]); 3 – the contours of the local area studied in greater detail; P – Romashkinskoye oil field

$$K = \frac{L \cdot J}{S},$$

где L – сумма длин водотоков; J – глубина вертикального расчленения; S – площадь ячейки [Жопылов, 2019].

Применение разработанной А.А. Златопольским [2008] программы LESSA, предназначенной для авто-

матизированного анализа ЦМР, позволило рассчитать ряд морфометрических параметров. К ним относятся линии вытянутости, ориентированные вдоль крупных линейных понижений рельефа. С помощью программы ArcGIS нами была построена схема плотности линий вытянутости (рис. 4). Таким образом, повышенные значения этого параметра приурочены к обла-

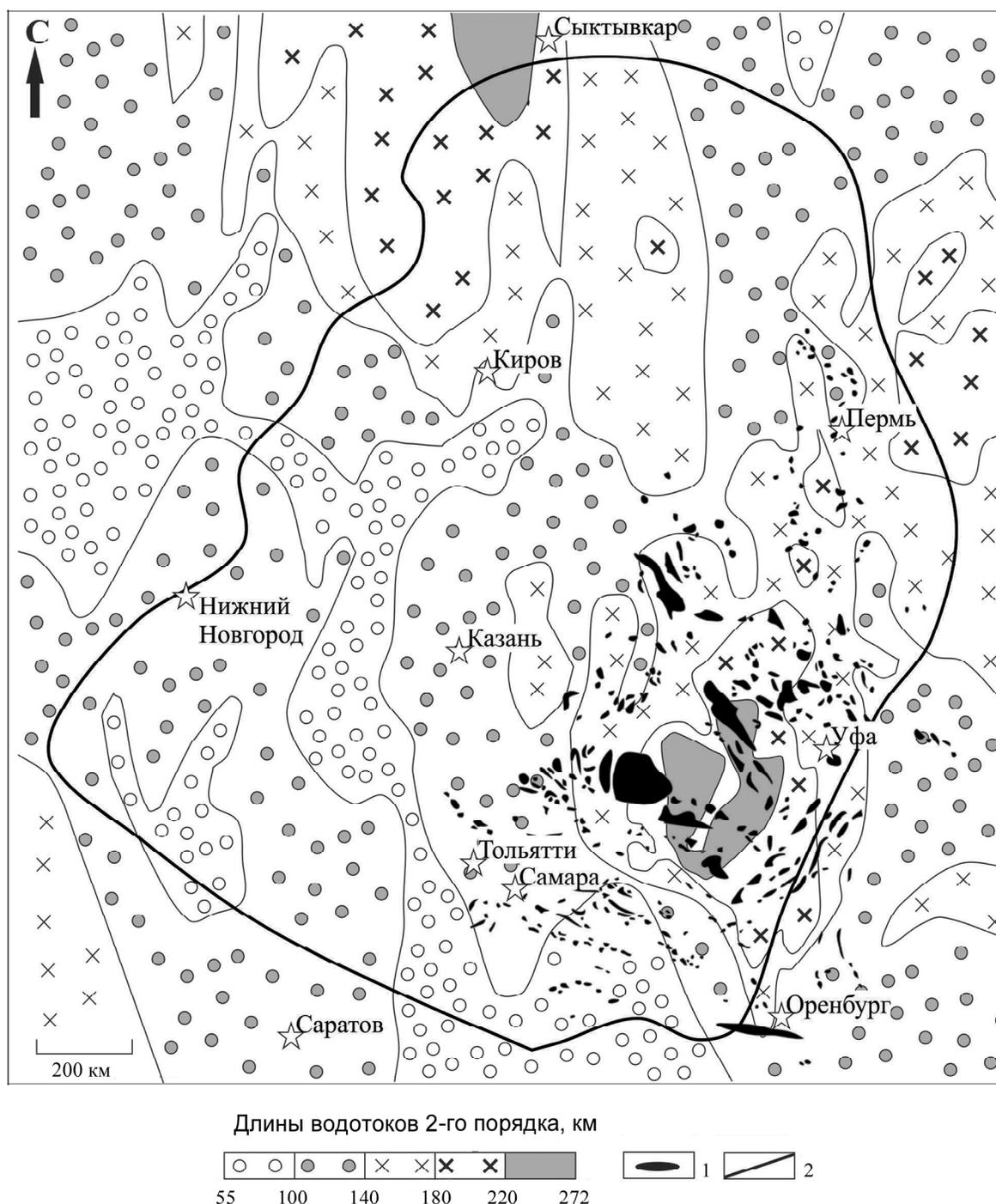


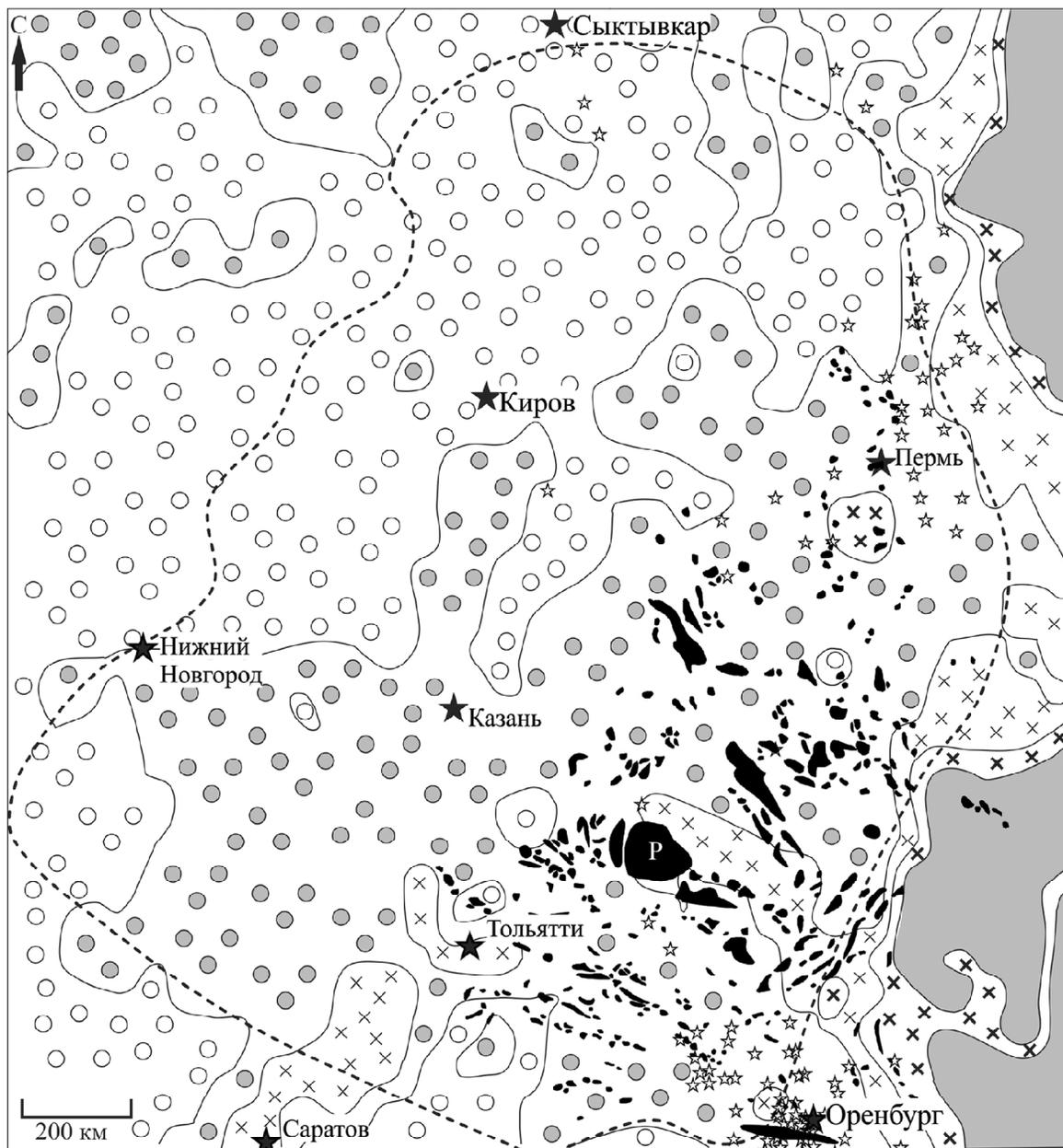
Рис. 2. Схема длин водотоков второго порядка Волго-Уральской антеклизы: 1 – нефтяные и газовые месторождения (по [Лозин, 2002]); 2 – границы Волго-Уральской антеклизы (по [Гаврилов, 1981])

Fig. 2. Scheme of the lengths of the 2nd order watercourses of the Volga-Ural anticline: 1 – oil and gas fields (after: [Lozin, 2002]); 2 – boundaries of the Volga-Ural anticline (after: [Gavrilov, 1981])

тям концентрации линейных элементов рельефа, значительная часть которых, как показано в работах [Горюнов и др., 2015; Колодяжный, 2015], приурочена к активным разломам. С целью показать на количественном уровне различия между морфометрическими характеристиками, рассчитанными для всей территории Волго-Уральской антеклизы и в пределах месторождений УВ, нами были определены медианы и квартили

(табл. 1), выполнена интервальная оценка медиан согласно [ГОСТ ..., 2004] (уровень доверия 0,90) (табл. 2).

Кроме того, для локального участка, расположенного в восточной части Волго-Уральской антеклизы, нами были построены розы-диаграммы, иллюстрирующие ориентировки длинных осей контуров линейно-вытянутых месторождений УВ [Лозин, 2002], водотоков [Цифровые..., 2020] и направления простирации



Глубина вертикального расчленения, м

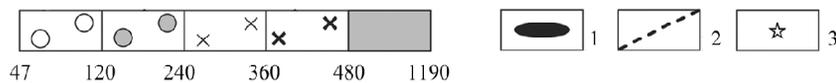


Рис. 3. Схема глубины вертикального расчленения Волго-Уральской антеклизы: 1 – нефтяные и газовые месторождения (по [Лозин, 2002]); 2 – границы Волго-Уральской антеклизы (по [Гаврилов, 1981]); 3 – эпицентры современных землетрясений (по [Сейсмологический..., 2020а, 2020б]); Р – Ромашкинское нефтяное месторождение

Fig. 3. Scheme of the vertical dissection depth of the Volga-Ural antecline: 1 – oil and gas fields (after: [Lozin, 2002]); 2 – boundaries of the Volga-Ural antecline (after: [Gavrilov, 1981]); 3 – epicenters of modern earthquakes (after: [Seismological..., 2020a, 2020b]); Р – Romashkinskoe oil field

склонов (рис. 5). Для определения последнего из упомянутых параметров использовался инструмент Aspect программы ArcGIS. Расчет средних круговых значений для роз-диаграмм выполнен по формуле, приведенной в монографии [Мардиа, 1978].

Также в работе показана опосредованная взаимосвязь между коэффициентом суммарной эрози-

онной расчлененности рельефа и современной сейсмичностью, данные о которой приведены в [Сейсмологический..., 2020а, 2020б].

В качестве вспомогательного метода использовалось компьютерное моделирование новейшей геодинамики Волго-Уральской антеклизы, выполненное с помощью программы RMS 2013 компании

Таблица 1

Сопоставление морфометрических характеристик рельефа в пределах всей территории Волго-Уральской антеклизы и месторождений УВ

Морфометрические параметры	Значения морфометрических параметров				
	Минимальные	Первый квартиль	Медиана	Третий квартиль	Максимальные
Разности базисных поверхностей первого и второго порядков, м	-711 (-112)	-8 (3)	11 (26)	36 (72)	500 (236)
Длины водотоков второго порядка, км	55 (55)	107 (141)	129 (156)	157 (196)	272 (258)
Плотность водотоков первого порядка, км ⁻¹	0 (0)	1,75 (2,14)	2,73 (3,07)	3,70 (3,90)	8,05 (6,66)
Глубина вертикального расчленения, м	47 (101)	105 (161)	134 (190)	193 (232)	1190 (785)
Крутизна склонов, град.	0 (0)	0,029 (0,096)	0,103 (0,157)	0,184 (0,233)	1,945 (1,014)
Максимальная кривизна рельефа, м ⁻¹	0,0121 (0,0126)	0,0571 (0,0868)	0,0769 (0,1051)	0,1143 (0,1446)	0,6470 (0,4952)
Плотность линий вытянутости, км ⁻¹	0,10 (3,68)	9,56 (11,39)	13,72 (15,30)	19,19 (21,15)	60,01 (49,13)

Примечание. Для территории месторождений значения морфометрических параметров приведены в круглых скобках.

Таблица 2

Доверительные интервалы медиан морфометрических параметров (уровень доверия 0,90)

Морфометрические параметры	Доверительный интервал медианы	
	Нижняя граница	Верхняя граница
Разности базисных поверхностей первого и второго порядков, м	11,12 (24,41)	11,50 (27,15)
Длины водотоков второго порядка, км	127,22 (156,36)	127,61 (157,84)
Плотность водотоков первого порядка, км ⁻¹	2,72 (3,03)	2,74 (3,09)
Глубина вертикального расчленения, м	133,58 (189,07)	134,32 (191,79)
Крутизна склонов, град.	0,102 (0,155)	0,104 (0,160)
Максимальная кривизна, м ⁻¹	0,0766 (0,1046)	0,0772 (0,1057)
Плотность линий вытянутости, км ⁻¹	13,68 (15,13)	13,77 (15,56)

Примечание. Для территории месторождений значения морфометрических параметров приведены в круглых скобках.

Рохар, позволившее выделить участки, в пределах которых достигаются наибольшие относительные величины сжимающих напряжений, и оконтурить области наиболее вероятного формирования новых разрывов малой протяженности. Исходными данными для моделирования служили ЦМР [Цифровая..., 2020] и составленная по методике Н.П. Костенко [1999] схема блоковой делимости [Мошкин и др., 2019]. На первом этапе по высотам рельефа была построена поверхность в формате grid. После этого на нее были нанесены наиболее протяженные и хорошо выраженные в рельефе «слабые» зоны, выделенные в работе [Мошкин и др., 2019] и рассматриваемые как вертикальные неоднородности. На третьем этапе были заданы осредненные характе-

ристики среды (коэффициенты Пуассона и внутреннего трения) и указан тип новейшего напряженного состояния. Нами были построены несколько моделей, отличающихся ориентировками главных нормальных осей напряжений, а в качестве наиболее достоверной была выбрана та, для которой достигается наибольшая согласованность рассчитанных с помощью моделирования параметров и реальных характеристик геолого-географической среды. При построении этой модели предполагалось, что на территории Волго-Уральской антеклизы преобладают сдвиговые деформации при ориентировке оси максимального сжатия по азимуту 90°. Обоснованность этого предположения подтверждается данными М.Л. Коппа и его коллег [Копп и др., 2017]. Физико-

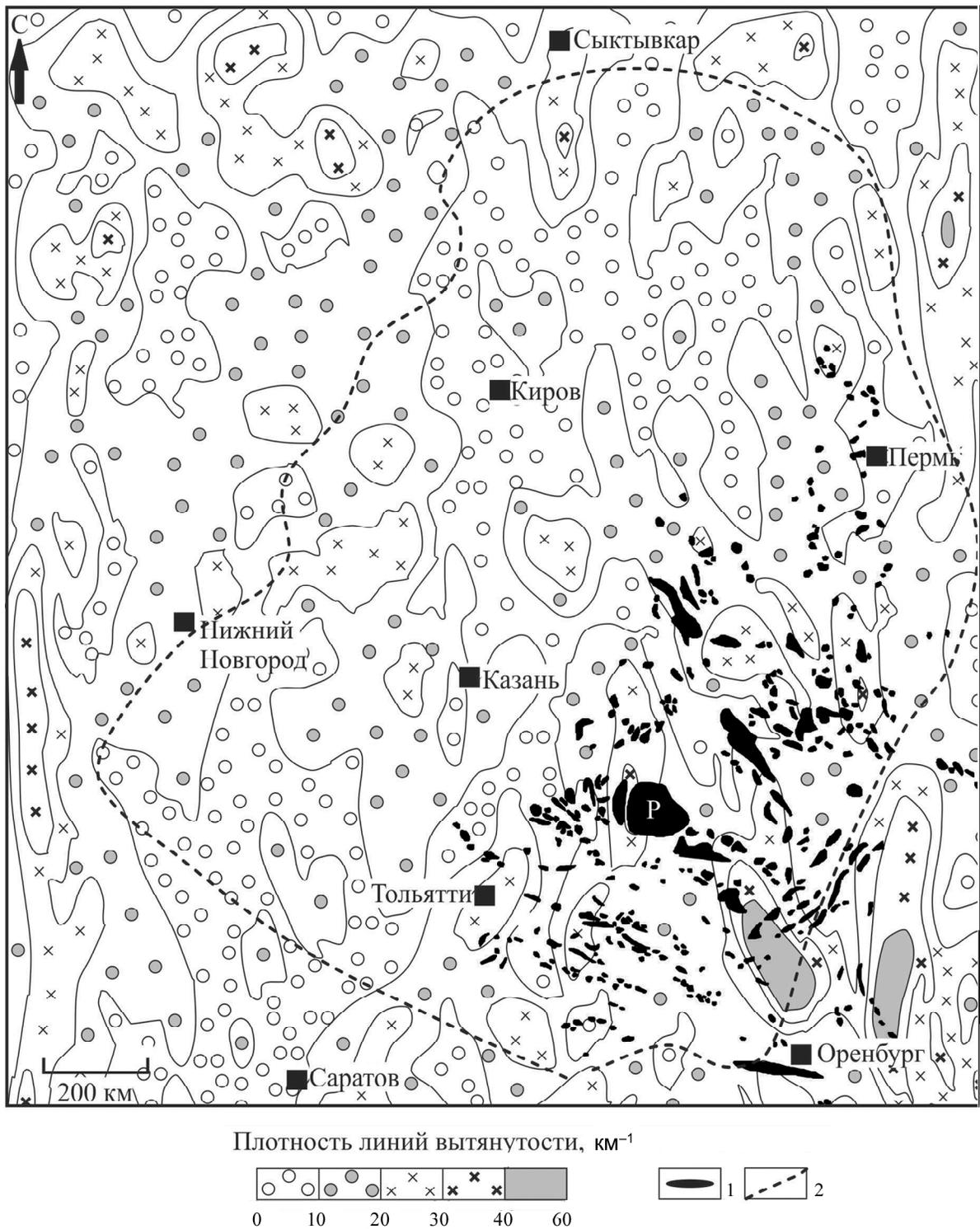


Рис. 4. Схема плотности линий вытянутости Волго-Уральской антеклизы: 1 – нефтяные и газовые месторождения (по [Лозин, 2002]); 2 – границы Волго-Уральской антеклизы (по [Гаврилов, 1981]); Р – Ромашкинское нефтяное месторождение

Fig. 4. Scheme of the density of the elongation lines of the Volga-Ural anteclise: 1 – oil and gas fields (after: [Lozin, 2002]); 2 – boundaries of the Volga-Ural anteclise (after: [Gavrilov, 1981]); Р – Romashkinskoye oil field

математической основой проведения расчетов в программе RMS 2013 является использование закона Кулона–Мора [Analysis..., 2020].

Результаты исследований и их обсуждение. Проведенные исследования показали наличие взаи-

мосвязи между рядом морфометрических параметров и особенностями локализации месторождений УВ Урала (см. рис. 1). Было установлено наличие локальных максимумов перечисленных в табл. 1 семи морфометрических параметров, приуроченных

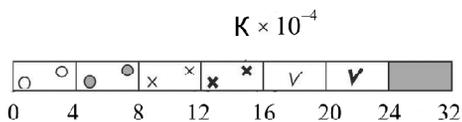
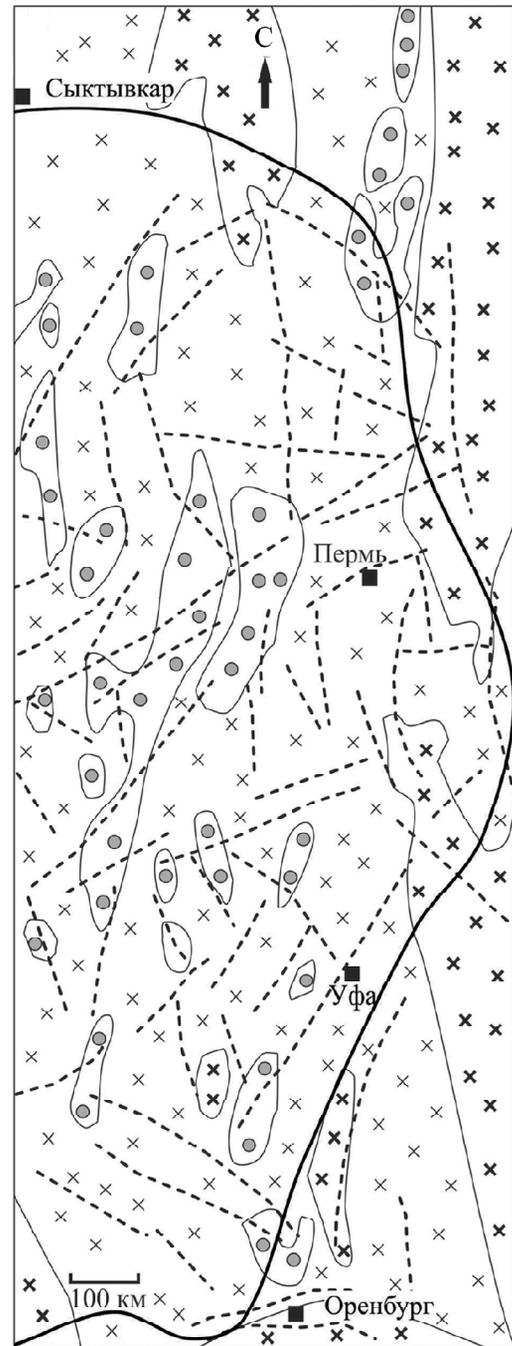
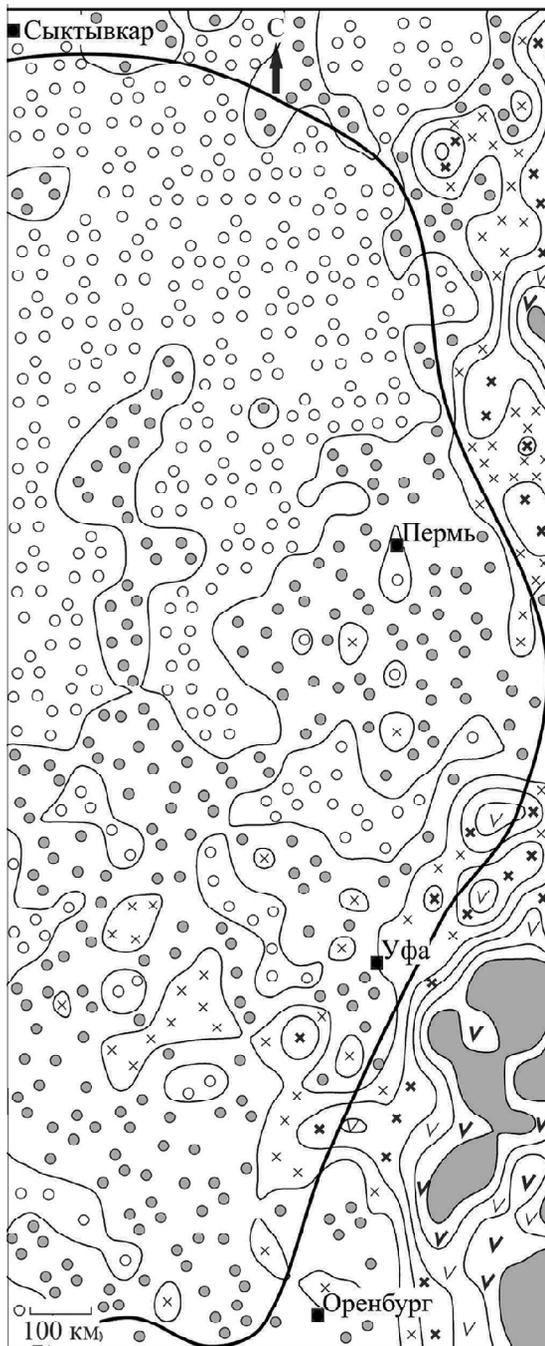
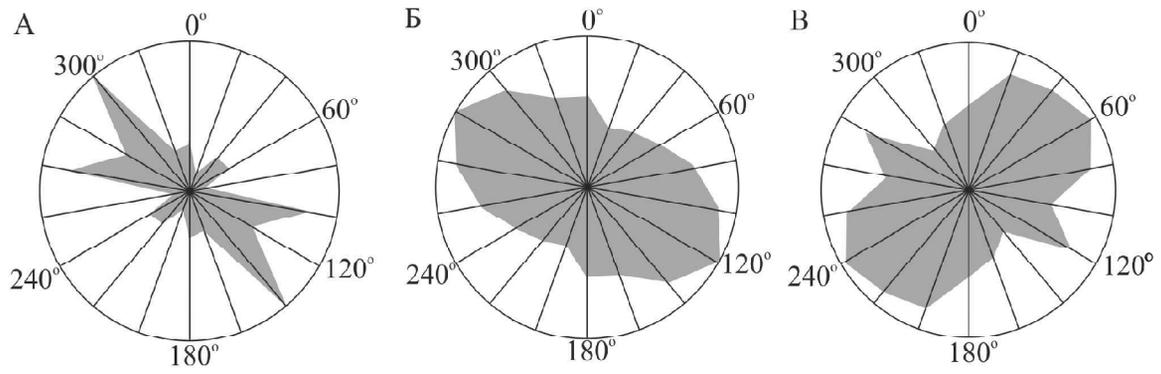
к юго-восточной части Волго-Уральской антеклизы, в пределах которой располагаются месторождения нефти и газа (см. рис. 1–4). В табл. 2 показано, что доверительные интервалы для медианных значений морфометрических показателей, определенных для всей территории антеклизы и в пределах месторождений УВ, не пересекаются. Таким образом, область, в пределах которой находится большое количество месторождений УВ, выделяется по комплексу морфометрических данных.

Для локального участка, расположенного в восточной части антеклизы, построены розы-диаграммы, характеризующие ориентировки длинных осей контуров линейно вытянутых месторождений УВ, водотоков и направлений простирающихся склонов (см. рис. 5). Большая часть удлиненных месторождений ориентирована в северо-западных румбах, статистически значимым является также северо-восточное направление, в то время как ортогональные (субширотное и субмеридиональное) направления выражены слабо. Среднее круговое значение составляет 310° . Большинство склонов также простирается в северо-западном направлении, а среднее круговое значение равно 319° . Преобладают водотоки, ориентированные в северо-восточном направлении, вторым по значимости является северо-западное направление, среднее круговое значение – 47° . Несоответствие ориентировок склонов и водотоков связано с тем, что при построении роз-диаграмм рассматривались достаточно крупные водотоки, показанные на схеме гидросети масштаба 1:2 500 000, учитывались данные об экспозиции всех склонов, в том числе и небольших, связанных с оврагами, притоками рек и т. п. Обобщая приведенные данные можно сделать вывод о том, что на территории Волго-Уральской антеклизы выделяются два главных направления линейных форм рельефа – северо-западное и северо-восточное, которые хорошо видны на розе-диаграмме, иллюстрирующей ориентировки контуров удлиненных месторождений УВ. По мнению А.А. Драгунова [2005], выделявшего в пределах Волго-Уральской нефтегазоносной провинции геодинамически активные зоны преимущественно северо-западного и северо-восточного простираний, эта особенность может быть связана с активизацией диагональной системы планетарной трещиноватости.

На наш взгляд, наиболее вероятной причиной взаимосвязи рельефа и особенностей локализации месторождений УВ являются неотектонические движения. Данные компьютерного моделирования показали, что наибольшие величины сжимающих напряжений достигаются в восточной части изучаемого района. Она отличается повышенной сейсмичностью (см. рис. 3) и высокими значениями коэффициента суммарной эрозионной расчлененности рельефа, максимальные величины которого на территории Волго-Уральской антеклизы западнее показанного на рис. 5 участка не превышают 12×10^{-4} . Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между относительными величинами сжимающих напря-

жений и коэффициентом суммарной эрозионной расчлененности рельефа составляет 0,48. Оценка значимости коэффициента корреляции выполнена по таблице Стьюдента.

По нашему мнению, для характеристики неотектонических движений Волго-Уральской антеклизы по рассчитанным морфометрическим параметрам последние можно разделить на две группы. К первой относятся разности базисных поверхностей, глубина вертикального расчленения, крутизна склонов и максимальная кривизна рельефа. Эти параметры являются наиболее информативными для оценки направленности вертикальных движений. Максимальные значения разности базисных поверхностей первого-второго порядков и глубины вертикального расчленения приурочены к краевой части испытывающего активное воздымание горного сооружения Урала (см. рис. 1, 3). В пределах Волго-Уральской антеклизы значения разности базисных поверхностей изменяются от -711 до 500 м (см. рис. 1), что свидетельствует о сложном дифференцированном характере новейших движений. Эти данные согласуются с результатами геоморфолого-неотектонического районирования: согласно [Карта..., 1980; Panina, Zaitsev, 2019], в новейшей структуре антеклизы выделяется большое количество разноранговых поднятий и впадин, осложненных линейментами и активными разломами. Интересно отметить, что северо-западная часть Волго-Уральской антеклизы отличается меньшими глубинами вертикального расчленения по сравнению с юго-восточной, где, по-видимому, происходили более интенсивные восходящие новейшие движения (см. рис. 2). Такое предположение согласуется с картой изобаз [Физико-географический..., 1964], согласно которой в северо-западной части Волго-Уральской антеклизы амплитуды новейших поднятий составляют $0-100$ м, а в юго-восточной достигают $200-300$ м. Распределения глубины вертикального расчленения, крутизны склонов и максимальной кривизны рельефа по территории отличаются рядом общих особенностей: коэффициент корреляции Спирмена между значениями глубины вертикального расчленения и крутизны склонов равен 0,59; между значениями глубины вертикального расчленения и максимальной кривизны рельефа – 0,86. Оценка значимости этих коэффициентов корреляции выполнена по таблице Стьюдента. Вторая группа морфометрических параметров включает длины водотоков второго порядка, плотность водотоков первого порядка и плотность линий вытянутости. На наш взгляд, они имеют вспомогательное значение для характеристики новейших движений рассматриваемой территории и отражают особенности пространственного рисунка (густоту, ориентировку) зон трещиноватости, которые прорабатываются гидросетью. В то же время для других районов эти параметры (например, длины водотоков разных порядков [Хубаева, 2003]) могут быть более информативными и использоваться для оконтуривания областей новейших поднятий и впадин.



Выводы:

– на количественном уровне показана взаимосвязь между семью морфометрическими параметрами рельефа (разностями базисных поверхностей первого и второго порядков, длинам водотоков второго порядка, плотностью водотоков первого порядка, глубины вертикального расчленения, крутизны склонов, максимальной кривизны поверхности рельефа, плотностью линий вытянутости) и особенностями локализации нефтяных и газовых месторождений Волго-Уральской антеклизы. Рассчитанные для территории месторождений медианные значения этих показателей превышают соответствующие величины, определенные для всей территории антеклизы;

– установлено сходство ориентировок контуров линейно-вытянутых месторождений и линейных элементов рельефа, заключающееся в преобладании северо-западного и северо-восточного направлений простираения склонов и длинных осей месторождений УВ;
– наиболее вероятной причиной взаимосвязи рельефа и нефтегазоносности являются неотектонические процессы. По результатам проведенного нами компьютерного геодинамического моделирования они происходят в сдвиговом поле напряжений при ориентировке оси сжатия в широтном направлении, а максимальные величины сжимающих напряжений достигаются в восточной части Волго-Уральской антеклизы, отличающейся повышенной расчлененностью рельефа и современной сейсмичностью.

Благодарности. Исследования проведены в рамках Госзадания ИФЗ РАН (А.О. Агибалов, А.А. Сенцов), НИР «Новейшая геодинамика и ее влияние на фильтрационные свойства геологической среды» (В.А. Зайцев, Е.А. Мануилова) и темы Госзадания ГИН РАН № 0135-2019-0047 (А.В. Полещук).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гаврилов В.П. Как устроены и чем богаты наши недра. М.: Недра, 1981. 191 с.
Голодовкин В.Д. Опыт применения карты расчлененности рельефа для прогноза тектонического строения южной части Куйбышевской области // Геоморфологические методы при нефтегазопроисловых работах. М.: Наука, 1966. С. 126–128.
Горелов С.К. Морфоструктурный анализ нефтегазоносных территорий (на примере юго-востока Русской равнины). М.: Наука, 1972. 206 с.
Горюнов Е.Ю., Игнатов П.А., Климентьева Д.Н., Халиков А.Н., Кравченко М.Н. Проявления современных подтоков углеводородов в нефтегазоносные комплексы на территории Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Геология нефти и газа. 2015. № 5. С. 62–69.
Драгунов А.А. Комплексное изучение геодинамически активных зон земной коры с использованием материалов дистанционных и геофизических исследований в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Казань, 2005. 182 с.
Златопольский А.А. Методика измерения ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (технология LESSA) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 102–112.
Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Современная геодинамика и нефтенакопление // Геология. 2008. № 12. С. 76–83.
Карта геоморфолого-неотектонического районирования нечерноземной зоны РСФСР. Масштаб 1:1 500 000 / гл. ред. В.И. Бабак. М.: ГУГК СССР, 1980.

Колодяжный С.Ю. Структура и эволюция Сурско-Камской зоны сдвига в кайнозойе (Волго-Уральская антеклиза Восточно-Европейской платформы) // Геотектоника. 2015. № 4. С. 30–53.
Копт М.Л., Колесниченко А.А., Макарова Н.В. Структурно-кинематический анализ рисунков гидросети для реконструкции и датирования новейших палеонапряжений в платформах (восток Русской плиты) // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2017. Т. 92. Вып. 5. С. 33–49.
Копылов И.С. Морфонеотектоническая система оценки геодинамической активности. Пермь: Издательский центр Пермского государственного национального исследовательского университета, 2019. 131 с.
Корчуганова Н.И. Новейшая тектоника с основами современной геодинамики. М.: Геокарт; ГЕОС, 2007. 353 с.
Костенко Н.П. Геоморфология. М.: МГУ, 1999. 379 с.
Лозин Е.В. Глубинное строение и нефтегазоносность Волго-Уральской области и смежных территорий // Литосфера. 2002. № 3. С. 46–68.
Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 240 с.
Мещеряков Ю.А. Рельеф СССР (Морфоструктура и морфоскульптура). М.: Мысль, 1972. 518 с.
Мингазов М.Н. Оценка перспектив нефтеносности осадочной толщи палеозоя на основе неотектонических исследований (на примере месторождений республики Татарстан): дис. ... канд. геол.-мин. наук. Казань, 2004. 237 с.

Рис. 5. Сопоставление схем коэффициента суммарной эрозионной расчлененности рельефа (К) (слева) и рассчитанных с помощью компьютерного моделирования относительных величин сжимающих напряжений (справа): 1 – «слабые» зоны; 2 – границы Волго-Уральской антеклизы (по [Гаврилов, 1981]). Вверху показаны розы-диаграммы, иллюстрирующие ориентировку линейно-вытянутых контуров месторождений нефти и газа (А), направления простираения склонов (Б) и водотоков (В)

Fig. 5. Comparison of the coefficient of total erosional dissection of the relief (K) (left) and the relative values of compressive stresses calculated using computer modeling (right): 1 – "weak" zones; 2 – the boundaries of the Volga-Ural antecline (after: [Gavrilov, 1981]). The above rose diagrams illustrate the orientation of linearly elongated contours of oil and gas fields (A), and the direction of the slopes trends (B) and streams (B)

Мингазов М.Н., Стриженов А.А., Мингазов Б.М. Неотектонические аспекты глубинной дегазации геоструктур Татарстана // Георесурсы. 2012. № 5. С. 51–55.

Морозов В.Н., Каган А.И., Колесников И.Ю., Татаринцев В.Н. Прогнозирование мест локализации углеводородов в градиентных полях тектонических напряжений // Экспозиция Нефть Газ. 2012. № 5. С. 57–60.

Мошкин И.В., Фадеева Т.И., Зайцев В.А. Трехмерное компьютерное моделирование Предуральяского краевого прогиба // Динамическая геология. 2019. № 3. С. 70–79.

Нетребин П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа: дисс. ... канд. геогр. наук. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2012. 227 с.

Применение геоморфологических методов в структурно-геологических исследованиях / под ред. И.П. Герасимова. М.: Недра, 1970. 293 с.

Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 251 с.

Спирidonov А.И. Геоморфологическое картографирование. М.: Недра, 1975. 184 с.

Судариков В.Н., Калинина О.Н. Дешифрирование южной части Волго-Уральской антеклизы по мелкомасштабным космическим снимкам // Вестник Оренбургского гос. ун-та. 2015. № 1. С. 181–186.

Физико-географический атлас мира. М.: АН и ГУГК СССР, 1964. 300 с.

Философов В.П. Методика вычисления и геолого-геоморфологическая интерпретация коэффициента расчлененности рельефа // Вопросы морфометрии. 1967. Т. 1. Вып. 2. С. 112–146.

Философов В.П. Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур / под ред. А.А. Корженевского. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1960. 91 с.

Хубаева О.Р. Морфоструктурный анализ долины реки Парагунки по данным морфометрических методов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 141–146.

Щеглов Д.И., Громовик А.И. Основы геоморфологии. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2017. 178 с.

Panina L.V., Zaitsev V.A. The Influence of the Basement on the Formation of the Newest Structure of the East European Platform, *Moscow University Geology Bulletin*, 2019, vol. 74, no. 4, p. 342–348, DOI: 10.3103/S0145875219040100.

Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, vol. 12, p. 47–56.

Электронные ресурсы

ГОСТ Р ИСО 16269-7-2004. Статистические методы. Статистическое представление данных. Медиана. Определение точечной оценки и доверительных интервалов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035332> (дата обращения 07.12.2020).

Analysis Package Reservoir Modelling System (RMS): Руководство пользователя. URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2 (дата обращения 07.12.2020).

Сейсмологический каталог Американской геологической службы. URL: www.earthquake.usgs.gov (дата обращения 07.12.2020а).

Сейсмологический каталог Единой геофизической службы РАН. URL: <http://www.ceme.gsras.ru/new/catalog/> (дата обращения 07.12.2020б).

Цифровая модель рельефа. URL: https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi (дата обращения 07.12.2020).

Цифровые топографические основы. URL: <https://vsegei.ru/ru/info/topo/> (дата обращения 07.12.2020).

Поступила в редакцию 21.08.2020

После доработки 05.11.2020

Принята к публикации 21.01.2021

A.O. Agibalov¹, V.A. Zaitsev², A.A. Sentsov³,
A.V. Poleshchuk⁴, E.A. Manuilova⁵

MORPHOMETRIC PARAMETERS OF RELIEF AND LOCALIZATION OF HYDROCARBON DEPOSITS WITHIN THE VOLGA-URAL ANTECLISE

The paper describes a complicated relationship between the relief and the oil and gas occurrence within the Volga-Ural antecline. Our geomorphologic studies have shown that the eastern part of the structure, with a large number of oil and gas fields, is marked by increased values of the following morphometric parameters: 1) the difference between the base surfaces of the first and second orders, constructed according to V.P. Filosofov's method at the scale of 1:2 500 000; 2) the length of watercourses of the second order; 3) the density of watercourses of the first order; 4) the depth of the vertical dissection; 5) the steepness of slopes; 6) the maximum curvature of the relief surface; 7) the density of the elongation lines constructed in the A.A. Zlatopolsky's LESSA program. It was found that the median values of these parameters within oil and gas fields exceed the corresponding values calculated for the entire territory of the Volga-Ural antecline, and the confidence intervals of the medians do not overlap. Using the automated analysis of the digital terrain model, a general pattern of orientations of linearly elongated oil and gas fields

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Department VII: Coordination and Prognostic Center, Earthquake prediction methods laboratory, Senior Scientific Researcher, PhD in Geology and Mineralogy; *e-mail*: Agibalo@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Dynamic Geology, Head of the Section of Geocatastrophe Research, PhD in Geology and Mineralogy; *e-mail*: v.zaitsev@mail.ru

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Department VII: Coordination and Prognostic Center, Earthquake prediction methods laboratory, Scientific Researcher; *e-mail*: alekssencov@yandex.ru

⁴ Geological Institute RAS, Tectonics Department, Consolidated Crust Tectonics Laboratory, Senior Scientific Researcher, PhD in Geology and Mineralogy; *e-mail*: anton302@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Dynamic Geology, postgraduate student; *e-mail*: manuilovaekaterina139@gmail.com

and slopes is revealed. The predominance of two main directions – north-west and north-east could be explained by the activation of the diagonal system of planetary fracturing. In our opinion, the relationship between the relief and oil and gas fields is due to the features of the recent tectonic movements influencing the shape of relief and the migration of hydrocarbons. The significance of neotectonic movements as factors of relief formation is evidenced by the fact that the epicenters of modern earthquakes are confined to the areas of increased horizontal and vertical dissection of relief. The relative amplitudes of compressive stresses were calculated using computer geodynamic modeling in the Roxar's RMS 2013 program. There is a numerical correlation between their values and the coefficient of total erosion dissection of the relief with the Spearman's rank correlation coefficient being 0,48. It is achieved if the latitudinal horizontal compression is set as an external load. Probably, this type of stress state manifests itself in recent times and is associated with the influence of the Urals mountain structure.

Key words: morphometric analysis of relief, oil and gas occurrence, geodynamics

Acknowledgements. The research was done under the state program tasks of the Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS (A.O. Agibalov, A.A. Sentsov), the research project "Recent geodynamics and its influence on the filtration properties of the geological environment" (V.A. Zaitsev, E.A. Manuilova) and the state program task no. 0135-2019-0047 (GIN RAS) (A.V. Poleshchuk).

REFERENCES

- Dragunov A.A. Kompleksnoye izucheniye geodinamicheskoy aktivnykh zon zemnoy kory s ispol'zovaniyem materialom distantsionnykh i geofizicheskikh issledovaniy v Volgo-Ural'skoy neftegazonosnoy provintsii* [Comprehensive study of active geodynamic zones of the earth's crust using the material of remote sensing and geophysical studies in the Volga-Ural oil and gas province], PhD dissertation in Geology and Mineralogy, Kazan, 2005, 182 p. (In Russian)
- Filosofov V.P. Kratkoye rukovodstvo po morfometricheskoy metodу poiskov tektonicheskikh struktur* [A short guide to the morphometric method of prospecting for tectonic structures], A.A. Korzhenevsky (ed.), Saratov, Izd. Saratovskogo un-ta, 1960, 91 p. (In Russian)
- Filosofov V.P.* [Calculation method and geological-geomorphologic interpretation of the relief dissection coefficient], *Voprosy morfometrii* [Questions of morphometry], 1967, vol. 1, no. 2, p. 112–146. (In Russian)
- Fiziko-geograficheskij atlas mira* [Physical-geographical atlas of the world], Moscow, Academy of Sciences and GUGK USSR Publ., 1964, 300 p.
- Gavrilov V.P. Kak ustroyeny i chem bogaty nashi nedra* [The structure and wealth of the entrails of the Earth], Moscow, Nedra Publ., 1981, 191 p. (In Russian)
- Golodovkin V.D.* [Experience of using a map of the rugged relief for predicting the tectonic structure of the southern part of the Kuybyshev region] *Geomorfologicheskie metody pri neftegazoposkovykh rabotah* [Geomorphological methods for oil and gas exploration], Moscow, Nauka Publ., 1966, p. 126–128. (In Russian)
- Gorelov S.K. Morfostrukturnyy analiz neftegazonosnykh territoriy (na primere yugo-vostoka Russkoy ravniny)* [Morphostructural analysis of oil and gas territories (case study of the southeast of the Russian Plain)], Moscow, Nauka Publ., 1972, 206 p. (In Russian)
- Goryunov E.Yu., Ignatov P.A., Klimentieva D.N., Khalikov A.N., Kravchenko M.N.* The show of present hydrocarbon inflow into oil and gas complexes in the Volga-Ural oil and gas province, *The geology of oil and gas.*, 2015, vol. 5, p. 62–69.
- Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T.* Sovremennaya geodinamika i neftenakopleniye [Modern geodynamics and oil accumulation], *Geologiya*, 2008, vol. 12, p. 76–83. (In Russian)
- Khubaeva O.R.* Morfostrukturnyy analiz doliny reki Paratunki po dannym morfometricheskikh metodov [Morphostructural analysis of the Paratunka river valley based on the data of morphometric methods], *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 2003, vol. 1, p. 141–146. (In Russian)
- Kolodyazhnyi S.Yu.* The Structure and Evolution of the Sura-Kama Strike-Slip Zone in the Cenozoic (the Volga-Ural Anticline of the East European Platform), *Geotectonics*, 2015, vol. 4, p. 30–53, DOI: 10.7868/S0016853X15040049.
- Kopp M.L., Kolesnichenko A.A., Makarova N.V.* Strukturno-kinematicheskyy analiz risunkov gidroseti dlya rekonstruktsii i datirovaniya noveyshikh paleonapryazheniy v platformakh (vostok Russkoy plity) [Structural-kinematic analysis of hydraulic network patterns for reconstruction and dating of the latest paleostresses in platforms (east of the Russian Plate)], *Byulleten MOIP. Otdel geologicheskij*, 2017, vol. 92, no. 5, p. 33–49. (In Russian)
- Kopylov I.S. Morfoneotektonicheskaya sistema otsenki geodinamicheskoy aktivnosti* [Morphoneotectonic system for assessing geodynamic activity], Perm: Izdatel'skiy tsentr Permskogo gosudarstvennogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta, 2019, 131 p. (In Russian)
- Korchuganova N.I. Noveyshaya tektonika s osnovami sovremennoy geodinamiki* [Recent tectonics with the foundations of modern geodynamics], Moscow, Geokart, GEOS Publ., 2007, 353 p.
- Kostenko N.P. Geomorfologiya* [Geomorphology], Moscow, MGU Publ., 1999, 379 p. (In Russian)
- Lozin Ye.V.* Glubinnoye stroeniye i neftegazonosnost' Volgo-Ural'skoy oblasti i smezhnykh territoriy [Deep structure and oil and gas content of the Volga-Ural region and adjacent territories], *Litosfera*, 2002, vol. 3, p. 46–68. (In Russian)
- Map of geomorphological-neotectonic zoning of the non-black earth zone of the RSFSR.* Scale 1 500 000, V.I. Babak (ed.), Moscow, GUGK USSR, 1980.
- Mardia K. Statisticheskyy analiz uglovykh nablyudeniy* [Statistical analysis of angular observations], Moscow, Nauka Publ., 1978, 240 p. (In Russian)
- Meshcheryakov Yu.A. Rel'ef SSSR (Morfostruktura i morfoskop'tura)* [Relief of the USSR (Morphostructure and morphosculpture)], Moscow, Mysl' Publ., 1972, 518 p. (In Russian)
- Mingazov M.N. Otsenka perspektiv neftenosnosti osadochnoy tolshchi paleozoya na osnove neotektonicheskikh issledovaniy (na primere mestorozhdeniy respubliki Tatarstan)* [Assessment of the oil-bearing prospects of the Paleozoic sedimentary strata on the basis of neotectonic studies (case study of the fields in the Republic of Tatarstan)], PhD dissertation in Geology and Mineralogy, Kazan, 2004, 237 p. (In Russian)
- Mingazov M.N., Strizhenok A.A., Mingazov B.M.* Neotektonicheskiye aspekty glubinnoy degazatsii geostruktur Tatarstana [Neotectonic aspects of deep degassing of the geostructures of Tatarstan], *Georesursy*, 2012, vol. 5, p. 51–55. (In Russian)
- Morozov V.N., Kagan A.I., Kolesnikov I.Yu., Tatarinov V.N.* Prognozirovaniye mest lokalizatsii uglevodородov v gradiyentnykh polyakh tektonicheskikh napryazheniy [Prediction of hydrocarbon

- areas localization in gradient fields of tectonic stresses], *Ekspozitsiya Nefti Gaz.*, 2012, vol. 5, p. 57–60. (In Russian)
- Moshkin I.V., Fadeyeva T.I., Zaytsev V.A. Trekhmernoye komp'yuternoye modelirovaniye Predural'skogo krayevogo progiba [3D computer modeling of the Ural foredeep], *Dinamicheskaya geologiya*, 2019, vol. 3, p. 70–79. (In Russian)
- Netrebin P.B. *Morfometricheskij analiz rel'efa Bol'shogo Kavkaza* [Morphometric analysis of the relief of the Greater Caucasus], PhD dissertation, Krasnodar, Kubanskiy gosudarstvennyy universitet, 2012, 227 p. (In Russian)
- Panina L.V., Zaitsev V.A. The Influence of the Basement on the Formation of the Newest Structure of the East European Platform, *Moscow University Geology Bulletin*, 2019, vol. 74, no. 4, p. 342–348, DOI: 10.3103/S0145875219040100.
- Primenenie geomorfologicheskikh metodov v strukturno-geologicheskikh issledovaniyah [Application of geomorphologic methods in structural-geological research], I.P. Gerasimov (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1970, 293 p. (In Russian)
- Shcheglov D.I., Gromovik A.I. *Osnovy geomorfologii* [Fundamentals of Geomorphology], Voronezh, Izdatel'skiy dom VGU, 2017, 178 p. (In Russian)
- Simonov Yu.G. *Ob'yasnitel'naya morfometriya rel'yefa* [Explanatory morphometry of the relief], Moscow, GEOS Publ., 1999, 251 p. (In Russian)
- Spiridonov A.I. *Geomorfologicheskoye kartografirovaniye* [Geomorphologic mapping], Moscow, Nedra Publ., 1975, 184 p. (In Russian)
- Sudarikov V.N., Kalinina O.N. *Deshifirovaniye yuzhnoy chasti Volgo-Ural'skoy anteklizy po melkomasshtabnym kosmicheskim snimkam* [Interpretation of the southern part of the Volga-Ural anteclise using small-scale satellite images], *Vestn. Orenburgskogo gos. un-ta*, 2015, vol. 1, p. 181–186. (In Russian)
- Zevenbergen L.W., Thome C.R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, vol. 12, p. 47–56.
- Zlatopolsky A.A. [Technique for measuring the orientation characteristics of remote sensing data (LESSA technology)], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern issues of the Earth's remote sensing from the space], 2008, vol. 5, no. 1, p. 102–112. (In Russian)
- Web sources*
- Analysis Package Reservoir Modeling System (RMS) User Manual, 2020, URL: www.geodisaster.ru/index.php?page=uchebnye-posobiya-2 (access date 07.12.2020).
- Digital Elevation Model, 2020, URL: https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi (access date 07.12.2020).
- Digital Topographic Foundations, 2020, URL: <https://vsegei.ru/ru/info/topo/> (access date 07.12.2020).
- GOST R ISO 16269-7-2004. Statisticheskie metody. Statisticheskoe predstavlenie dannyh. Mediana. Opredelenie tochechnoy ocenki i doveritel'nyh intervalov [Statistical methods. Statistical presentation of data. Median. Determination of the point estimate and confidence intervals], URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035332> (access date 07.12.2020). (In Russian)
- Seismological Catalog of the American Geological Survey, 2020a, URL: www.earthquake.usgs.gov (access date 07.12.2020).
- Seismological catalog of the Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2020b, URL: <http://www.ceme.gsras.ru/new/catalog/> (access date 07.12.2020).

Received 21.08.2020

Revised 05.11.2020

Accepted 21.01.2021