

Цифровое моделирование рельефа для прогноза площадей, перспективных на нефть и алмазы

Ю.Г. Кутинов*, З.Б. Чистова, Е.В. Полякова, А.Л. Минеев
ФИЦКИА РАН им. ак. Н.П. Лаверова, Архангельск
e-mail: *kutinov@fciarctic.ru

Аннотация. На основе цифрового моделирования (по авторским методикам) проведены расчеты отражения структур кристаллического фундамента в современном рельефе и геоморфометрических параметров тектонических узлов.

По результатам расчетов авторами сделаны выводы, что проявления кимберлитового магматизма и площадей, перспективных на поиски нефти, приурочены к прямым формам отражения структур фундамента в современном рельефе («выступ-выступ») и к определенным типам тектонических узлов.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, геоморфометрические параметры, нефть, кимберлиты.

Для цитирования: Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В., Минеев А.Л. Цифровое моделирование рельефа для прогноза площадей, перспективных на нефть и алмазы // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8>

Введение

Целью работы являлось выявление признаков проявлений кимберлитового магматизма и зон глубинного нефтегазообразования в современном геодинамическом режиме Арктического сегмента земной коры (на примере территории Архангельской области) путем расчетов на основе цифрового моделирования рельефа.

Появление новейших достижений в области разработки глобальных моделей геодинамических процессов укрепило позиции ученых, увязывающих процессы нефтеобразования со спецификой условий глубинной (подкоровой) генерации углеводородов (УВ). Контролирующая роль при этом отводится протяженным линейным трещинным каналам, обуславливающим миграцию, аккумуляцию и сохранность продуктов дегазации верхней мантии, в том числе и генерированных нефтегазоводяных флюидов [1]. Таким образом, существующие на настоящий момент материалы подтверждают одну из ведущих ролей глубинных долгоживущих разломов в образовании нефтегазоносных месторождений [2]. Однако следует признать, что до сих пор остается неясным и требует объяснения следующее: сам факт существования такой связи, предопределенной, очевидно, особенностями эволюции и строения сдвиговых зон, а также возможный механизм, обуславливающий флюидную миграцию в них; циркумзональное

изменение напряженно-деформированного состояния земной коры и фазового состава УВ, выраженного в увеличении магнитуд землетрясений, отражающих геодинамический режим, в омоложении стратиграфического диапазона нефтегазоносности и облегчении (метанизации) нафтидов от центров бассейнов к периферии [3]. Современные данные свидетельствуют о том, что, в целом, запасы нефти в нефтегазовых осадочных бассейнах (ОБ) не зависят (или слабо зависят) от тектонотипа ОБ, его возраста, истории тектонического развития, полноты стратиграфического разреза, литологического состава и мощности чехла, содержания рассеянного органического вещества (РОВ) и положения в разрезе материнской толщи [4]. По мнению того же автора, земная кора над зонами нефтегазонакопления (ЗНГ) и очагами генерации УВ резко отличается по глубинному строению и характеризуется:

- повышенным залеганием границы Мохоровичича (Мохо), ярко выраженным антиклинорным строением нижнекоровых и верхнемантийных неоднородностей;
- возбужденной мантией и наличием мантийных астенолитов;
- повышенной расслоенностью и наличием корового волновода;
- океанизацией земной коры с полной редукцией гранитного слоя;
- сокращенной мощностью земной коры, пониженным положением кровли фундамента, увеличением мощности осадочного чехла;
- наличием зон деструкции и разуплотнением земной коры и верхней мантии;
- понижением плотности пород (уменьшение граничных скоростей сейсмических волн и отрицательные аномалии силы тяжести);
- повышенными значениями градиентов амплитуд и скоростей новейших тектонических и современных движений.

С этих позиций авторами и был рассмотрен исследуемый регион. В то же время хотелось бы отметить, что вряд ли стоит ожидать полного проявления всех перечисленных признаков в каждом конкретном регионе. В целом, эти признаки, по мнению авторов, соответствуют наличию мантийных плюмов и сводового воздымания территории, проявившегося на разных этапах геологического развития регионов.

Еще одним эмпирическим признаком можно считать пространственную близость к нефтегазовым бассейнам (НГБ) проявлений базитового, ультраосновного и кимберлитового магматизма.

Полученные по Якутской алмазоносной провинции сведения [5] позволяют отметить: а) приуроченность месторождений алмазов к высоко зрелой по флюидному режиму, истощенной в отношении легкоплавких элементов литосфере, глубоко эродированной еще в докембрии, что подтверждается характером теплового потока; б) прямую корреляцию времени консолидации цоколя платформ с возрастом алмазов и его спутников; в) «холодное» состояние алмазоносных горизонтов мантии, установленное по древним коэситсодержащим ксенолитам; г) наличие высокобарной минерализации, в том числе пиропов в «вязких» базальтоидных магматитах алмазоносных районов; д) факты проявления у подошвы земной коры алмазоносных районов региональных сейсмоволновых [6], электромагнитных [7] и гравитационных [8] неоднородностей, интерпретируемых как поднятие эвстатическими движениями термогравитационной конвекции линзы протокимберлитового субстрата. Эти данные приводят к непротиворечивому выводу о совокупности тектоносферных процессов, в том числе раннедокембрийского алмазообразования, и перемещения продуктивного субстрата вплоть до сиалической коры. В целом предложенные признаки земной коры в районах ЗНГ и проявлений кимберлитового магматизма, за исключением значений теплового потока, весьма схожи (рис. 1).

Из предлагаемой модели следует, что процессы образования кимберлитовых таксонов и НГБ должны отражаться в строении фундамента, осадочного чехла и в структуре современного рельефа.

Следует отметить, что: 1) тектонические структуры рассматриваемого региона пережили сложную эволюция развития, насчитывающую до 10 этапов тектонической активизации; 2) существуют многочисленные разрозненные факты, подтверждающие наследование тектонических структур на разных уровнях разреза [9, 10]; 3) практически отсутствуют результаты анализа пространственных закономерностей наследования.

Вышеозначенная проблема имеет не только теоретическое, но и практическое значение, так как наследование и/или отсутствие одного позволяет сделать вывод о миграции глубинных флюидов по латерали и вертикали. Поэтому, в первую очередь, на данном этапе исследований авторами была предпринята попытка проанализировать пространственные закономерности наследования структур фундамента в современном рельефе [11].

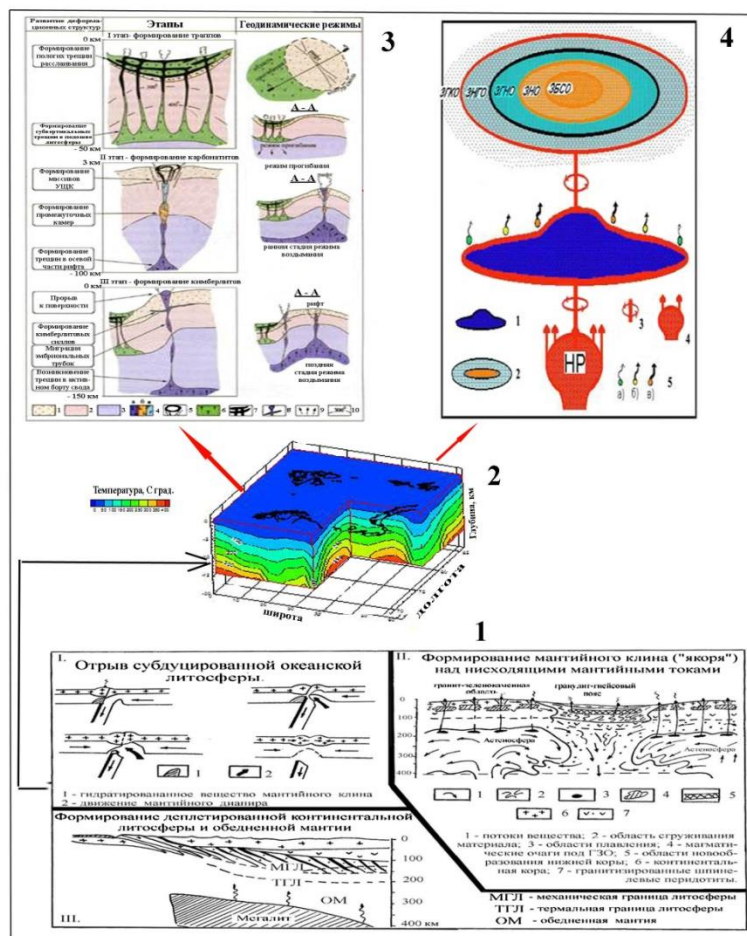


Рис. 1. Модель образования кимберлитовых провинций и зон глубинного нефтегазоаккумуляции:

1 – Схема развития начального этапа возникновения платформенного (траппы, карбонатиты, кимберлиты) магматизма [12]: I – формирование мегалита за счет процессов субдукции, II – формирование суперплюма при перемещении мегалита, III – формирование локальных плюмов при подъеме суперплюма;

2 – 3D-температурный плот Баренцевоморского региона (Т, °C) [13];

3-4 – образование сводовых поднятий и формирование кимберлитовых провинций и зон глубинного нефтегазоаккумуляции: **3** – тектоно-физическая модель развития платформенного магматизма (по [14]): центральная колонка – этапность платформенного магматизма, правая колонка – доминирующие геодинамические режимы, левая – развивающиеся деформационные структуры: 1 – осадочный чехол, 2 – кристаллический фундамент. 3 – верхняя мантия, 4 – ультрабазиты (а), породы серии якупирангит, мельтейгит, ийолит, уртит (б), нефелиновые сиениты и мелилититовые породы (в), 5 – карбонатиты, 6 – траппы, 7 – интрузивные трапповые силы, дайки и диатремы, 8 – кимберлитовые трубки, дайки, силы, 9 – направления главных усилий. 10 – положение изотерм в период формирования траппов; **4** – модель ротационно-сдвигового механизма нафтидогенеза [3]: ЗБСО – зона образования тяжелой нефти, горючих сланцев, ЗНО – зона образования преимущественно нефти высокой и средней плотности, ЗГНО – зона газонефтеобразования, ЗНГО – зона нефтегазоконденсатообразования, ЗГКО – зона доминирования газоконденсатообразования, НР – мантийный плюм: 1 – отрыв, подъем и растекание горячей мантийной подушки плюма, 2 – эллипсоид вращения мантийной подушки плюма, 3 – гипоцентр ротации мантийной подушки плюма, 4 – материнский (мантийный) флюидодинамический поток. 5 – трансформация метастабильных тяжелых УВ на легкие (а), средние (б), тяжелые (в) составляющие

Методика исследований

Сопоставление роз-диаграмм, построенных авторами по территории Архангельской области (рис. 2) (в рамках трапеции Q-37-38, P-37-38) и отдельных ее частей, а также различных регионов бывшего СССР [10], позволяет сделать вывод о том, что мы имеем дело с универсальным свойством геокинематики недр, то есть деление земной коры, во всяком случае, с архея происходило по одним и тем же системам разломов.

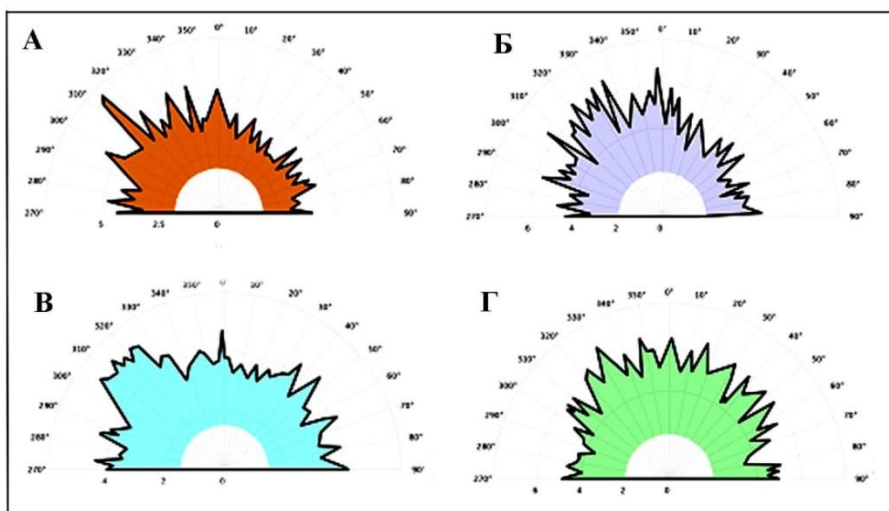


Рис. 2. Розы-диаграммы элементов-индикаторов разломов территории Архангельской области (обработка данных масштаба 1:200000): А – поля силы тяжести; Б – магнитного поля; В – космофотолинеаментов; Г – гидросети [10]

Статистический анализ азимутального распределения признаков разломов в физических полях и в природной обстановке показал, что одни и те же направления имеют максимальное представительство и на космофотоснимках, и в геоморфологических материалах, отражающих современные напряжения в земной коре, и в потенциальных полях, фиксирующих, в основном, строение докембрийского фундамента региона (см. рис. 2).

Этот факт говорит об определенной «консервативности» разрывных дислокаций и о длительной истории их развития, что, несомненно, нашло свое отражение в строении осадочного чехла и было подчеркнуто экзогенными процессами. Это обеспечило проявление практически всех тектонических систем коренных пород на дневной поверхности.

В дальнейшем авторами было проведено сопоставление подготовленной цифровой модели рельефа (ЦМР) современной территории Архангельской области (рис. 3, В), схемы неотектонического районирования северной части Русской плиты (рис. 3, А) и схемы

условной вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений (рис. 3, Б) по неотектоническим данным на площади Мезенской синеклизы [15], построенной на основе анализа деформаций подошвы четвертичных отложений, которое показало тождественность выделяемых структур (во всяком случае, площадное совпадение).

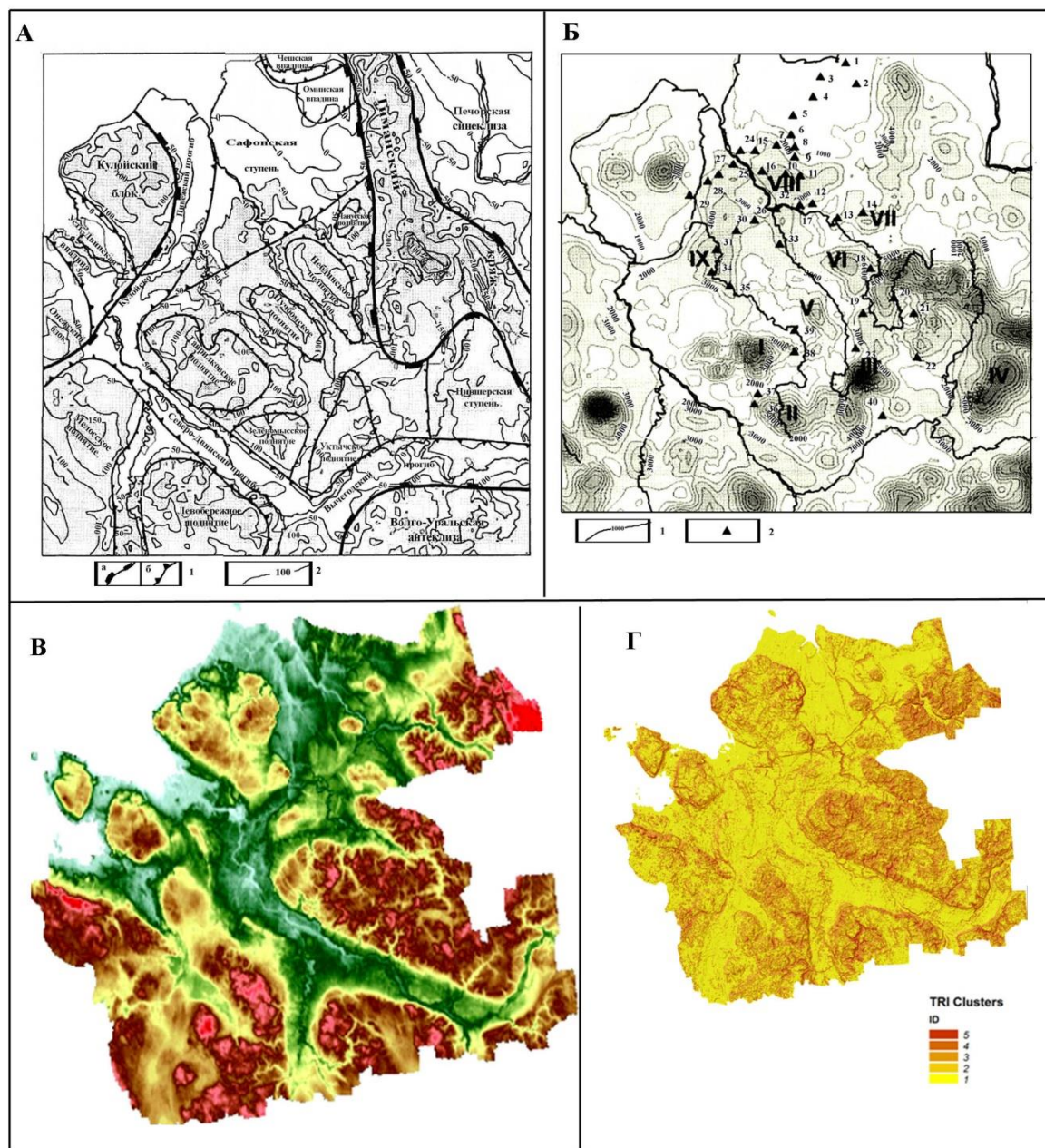


Рис. 3. Результат сопоставления материалов:

А – схема неотектонического районирования северной части Русской плиты [15]: 1 – границы структур первого (а) и второго (б) порядков; 2 – стратоизогипсы поверхности дочетвертичных отложений, м; Б – схема условной вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений по неотектоническим данным на площади Мезенской синеклизы [15]; В – подготовленная ЦМР [16]; Г – карта индекса расчлененности рельефа

Учитывая, что при построении схемы условной вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений использовались значения мегатрещиноватости территории [15], сопоставление проводилось также с картой индекса расчлененности рельефа (рис. 3, Г).

Данные о глубине залегания фундамента получены из «Карты рельефа поверхности фундамента» масштаба 1:1000000 [9]. Процесс получения цифровой модели рельефа поверхности фундамента состоял из трех этапов: 1) сканирования исходного материала; 2) оцифровки изогипс глубин залегания фундамента; 3) создания цифровой модели глубины залегания в среде ESRI ArcGIS 10 с применением модуля TopoRaster. Цифровая модель дневного рельефа Архангельской области строилась на основе глобальной модели ASTER GDEM v.2, дополненной в областях разрыва данными GMTED2010. Методика построения подробно описана в [16], анализ точности построенной модели – в работе [17].

Поскольку территория области относится к равнинной или к территории древней платформы, где высота рельефа земной поверхности измеряется десятками и, в редких случаях, первыми сотнями метров, а глубина залегания архей-протерозойского фундамента – километрами (рис. 4, А), произвести анализ зависимости величин друг от друга графически представляется затруднительным. Поэтому было проведено математическое нормирование значений высот рельефа дневной поверхности $R(x)$ и глубин фундамента $F(x)$ в диапазоне от 0 до 1 по следующей формуле: $y' = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}$.

В результате была создана матрица нормированных значений глубины залегания фундамента MF_n и матрица нормированных значений высоты рельефа поверхности MR_n . Дальнейший анализ характера отражения структур фундамента в дневном рельефе осуществлялся на основе значений матриц разности ($M^- = MF_n - MR_n$) и суммы ($M^+ = MF_n + MR_n$). Значения разностей и сумм нормированных значений описывают определенные формы рельефа фундамента и дневной поверхности (рис. 4, А). На первом этапе стояла задача разделить область исследования на два типа форм (обратные и прямые). Для этого введено понятие абсолютной разницы нормированных значений матриц высоты земной поверхности и глубины залегания фундамента: $M^{abs} = |MF_n - MR_n|$. Имея в виду такое обозначение, можно говорить, что:

- 1) значения матрицы абсолютной разности M^{abs} , приближающиеся к 1, будут соответствовать обратным формам;
- 2) значения матрицы абсолютной разности M^{abs} , приближающиеся к 0, будут соответствовать прямым формам (рис. 4, Б).

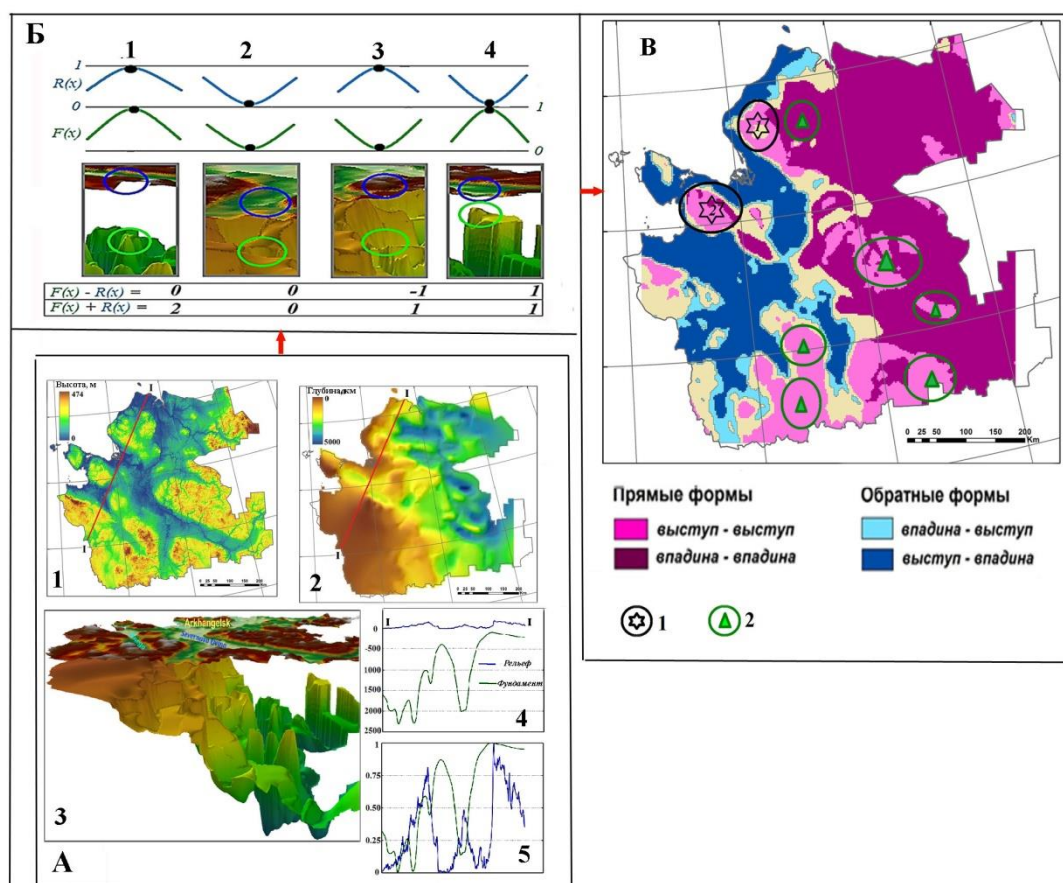


Рис. 4. Наследование структур фундамента в современном рельефе:

А – пример нормирования значений высот рельефа дневной поверхности и глубин фундамента по профилю А-А': 1 – цифровая модель рельефа на территорию Архангельской области, 2 – цифровая модель рельефа поверхности фундамента, 3 – сопоставление моделей в 3D, 4 – график значений по профилю А-А', 5 – график нормированных значений по профилю А-А'; **Б** – разность и сумма нормированных значений функций: 1), 2) – прямые (повторяющиеся) формы; 3), 4) – обратные (противоположные) формы; **В** – районирование территории Архангельской области по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе: 1 – площади проявления щелочно-ультраосновного магматизма; 2 – площади, перспективные на обнаружение нефти и газа

На следующем этапе решалась задача выделения внутренней структуры форм (см. рис. 4, Б). Обратные формы по своей внутренней структуре делятся на два класса: 1) **впадина-выступ** – те участки области исследования, в которых одновременно с опусканием фундамента наблюдается поднятие земной поверхности, их характеризуют значения матриц разницы, близкие к -1 ; 2) **выступ-впадина** – участки, в которых одновременно с поднятием фундамента наблюдается опускание земной поверхности, им соответствуют значения матриц разности, близкие к $+1$. Прямые формы, в свою очередь, также делятся на два класса: 1) **выступ-выступ** – те участки, в которых одновременно с поднятием фундамента наблюдается поднятие земной поверхности, их характеризуют

значения матриц суммы, близкие к 2; 2) **впадина-впадина** – участки, в которых одновременно с опусканием фундамента наблюдается опускание земной поверхности, им соответствуют значения матриц суммы, близкие к 0.

Комбинируя значения матриц разницы и суммы таким способом, можно провести районирование исследуемой территории по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе (см. рис. 4, В). Результаты расчетов говорят о том, что проявления кимберлитового магматизма и площадей, перспективных на поиски нефти, приурочены к прямым формам отражения структур фундамента в современном рельефе, структурно характеризующиеся как «выступ-выступ» (см. рис. 4, В).

Отдельным вопросом было проведение исследований структуры дневного рельефа на площади тектонических узлов 1-го порядка на исследуемой территории с помощью расчетов значений геоморфометрических параметров по созданной авторами цифровой модели рельефа [16] и их дальнейший анализ для выявления закономерностей и характера проявления, присущих дневному рельефу тектонических узлов. Для решения этой задачи были рассмотрены 18 наиболее крупных тектонических узлов (рис. 5).

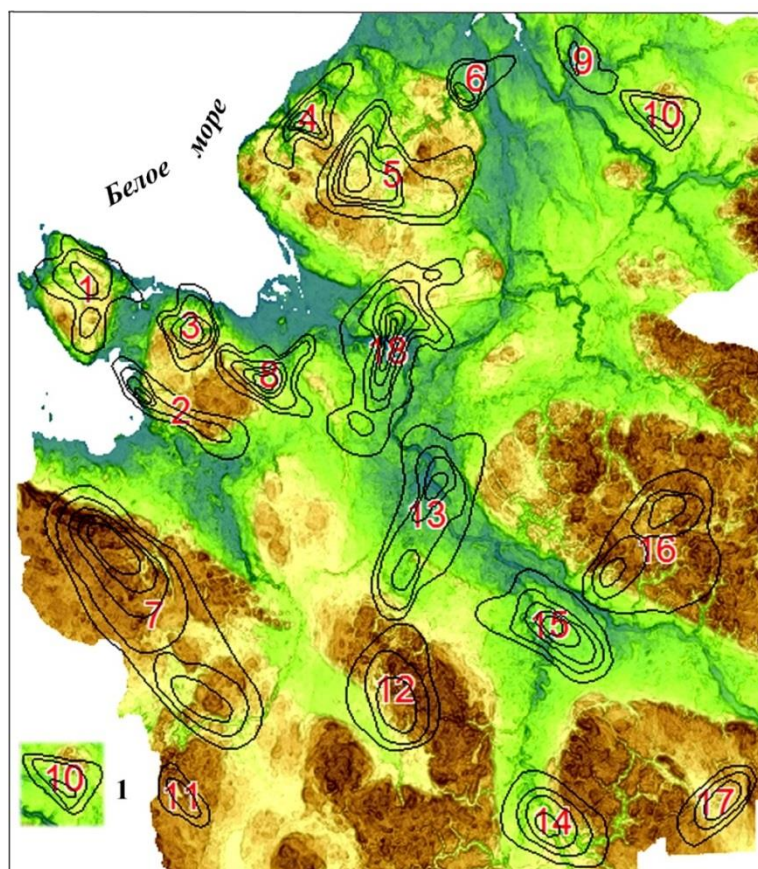


Рис. 5. Территориальное расположение исследуемых тектонических узлов
(1 – контур тектонического узла и его номер)

Методика выделения систем разломов и узлов их пересечения достаточно детально изложена в ряде работ авторов [10, 18], и изображена на схеме (рис. 6). В принципе, можно было бы и ограничиться расчетом наследования структур фундамента, но в этом случае каналы миграции глубинной нефти будут рассматриваться как линейные тектонические структуры. Следует отметить, что выделенные тектонические узлы не являются аналогами аномалий повышенной плотности линеаментов, так как при их построении в полной мере использовались геологогеофизические материалы, а не только результаты дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

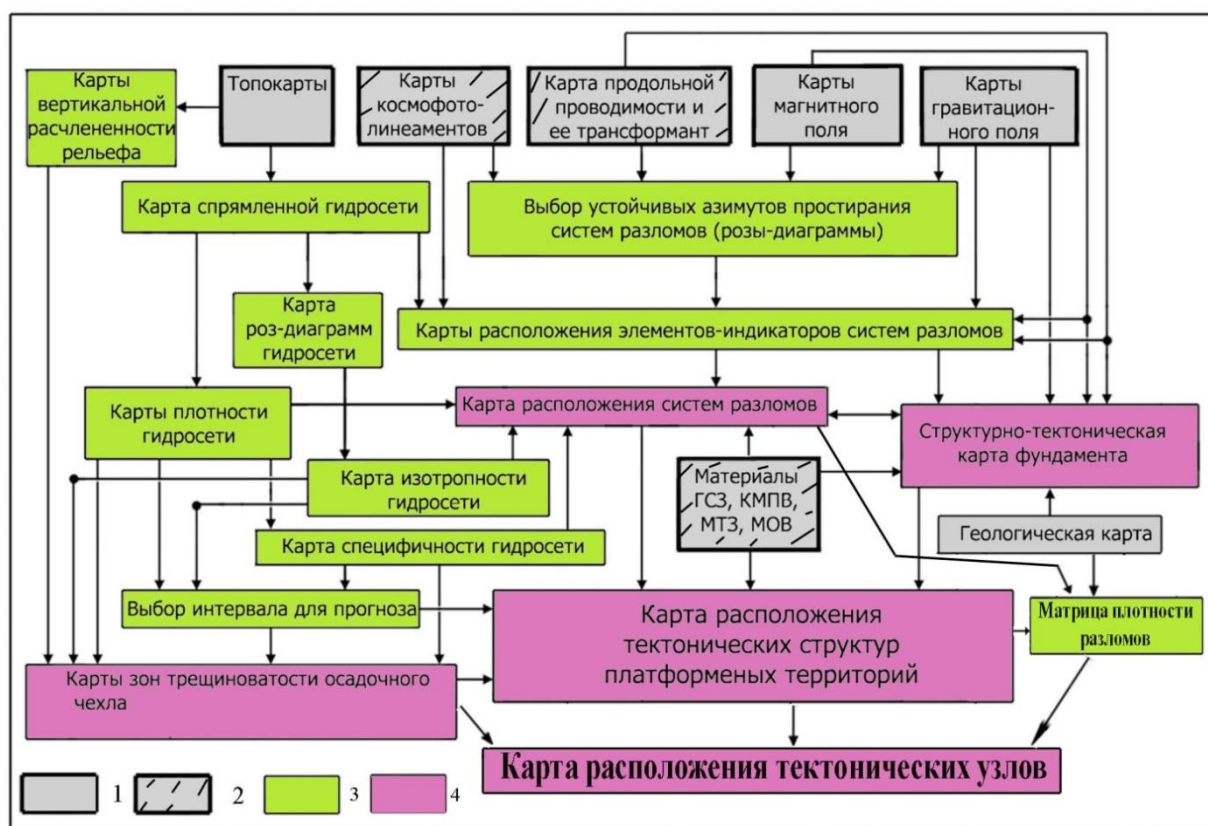


Рис. 6. Алгоритм выделения систем разломов и тектонических узлов: 1–2 – архивные материалы: 1 – имеющиеся для всех территорий древних платформ, 2 – не всегда имеющиеся; 3–4 – карты и материалы, получаемые в процессе исследований: 3 – промежуточные, 4 – окончательные

В результате была создана карта тектонических узлов для территории Архангельской области. Узлы пересечения разрывных нарушений – это только внешние признаки тех тектонических структур, индикаторами которых они являются. Узлы представляют собой сложнопостроенные как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях объемные тела, простирающиеся на большие глубины [19, 20]. Площадь таких узлов определяется шириной пересекающихся сквозных зон разломов: они представляют

собой участки повышенной раздробленности и проницаемости земной коры (участки повышенной тектонической трещиноватости в осадочном чехле) и связанные с ними гидро- и геохимические аномалии. С увеличением числа пересекающихся зон (как выраженных в верхних частях земной коры, так и скрытых) степень раздробленности, проницаемости и, вероятно, глубинности тектонического узла возрастает. Поэтому множественность пересечений и аномальность разломов, их образующих, является одним из индикаторов глубинности и перспективности узла. По убеждению авторов, такими каналами являются, в первую очередь, узлы тектонических нарушений. Проведенное авторами ранее сопоставление геолого-геофизических материалов [21, 22] по Архангельской, Канадской и, частично, Сибирской алмазоносным провинциям показало, что «след» надпорядковых тектонических узлов, их контролирующих, наблюдается: в пониженных значениях температуры в литосфере, с глубины, как минимум, 200 км и практически до дневной поверхности; в значениях теплового потока; в структуре потенциальных полей; в строении поверхности Мохо и кристаллического фундамента; в мощности нижнего, среднего и верхнего слоя земной коры; в современном геодинамическом режиме, что отражается в макросейсмическом поле, дегазации и ионизации атмосферы (рис. 7).

В целом, еще с докембрия здесь была сформирована вертикальная стволовая структура с аномальными свойствами среды, находящаяся в колебательном режиме. Узлы характеризуются повышенной мощностью литосферы и добротностью мантии (как минимум, до 400 км) [23]. Таким образом, алмазоносным провинциям соответствует значительно большая глубина проникновения хрупких деформаций, чем обычно считается, и, как следствие, глубинная дегазация. Строение надпорядкового тектонического узла имеет фрактально-подобную (древовидную) структуру, схожую со структурой адвективных поднятий и диапиров мантийных астенолитов.

Глубинность тектонических узлов региона обычно определялась по данным геопотенциальных полей и с применением корреляционного метода преломленных волн (КМПВ) и, как следствие, ограничивалась кровлей кристаллических пород фундамента, и в редких случаях уточнялась по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) – из-за редкой сети профилей [10]. В целом, наблюдается та же тенденция, что и на уровне «мантия-литосфера», т.е. тектонические узлы первого порядка (рис. 8) имеют такую же фрактально-подобную (древовидную) структуру, что объясняет расположение

нефтегазовых бассейнов в пространственной близости от алмазоносных провинций и их глубинный генезис.

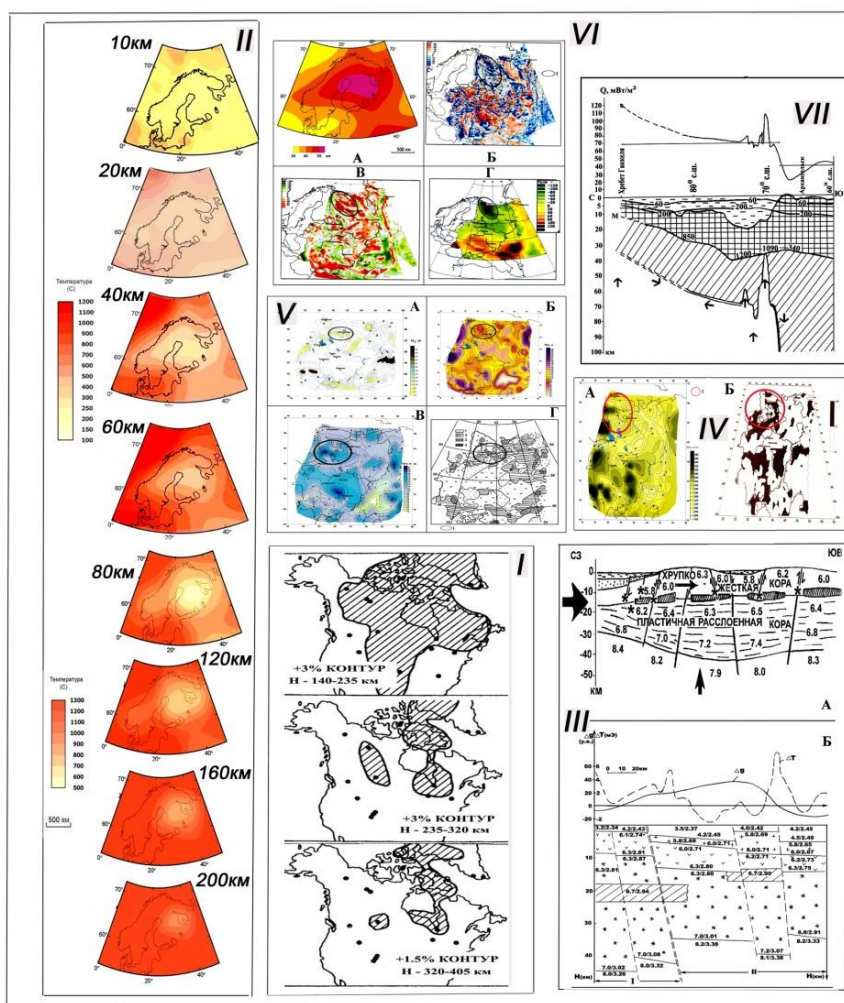


Рис. 7. Модель тектонического узла на уровне «мантия-литосфера» (по [22] с дополнениями): **I** – возмущенные скорости поперечных сейсмических волн согласно томографической инверсии сейсмических волн (провинция Саскачеван, Канада) [23]; **II** – термическая модель литосферы региона на разных глубинах [24]; **III** – строение земной коры Балтийского щита и прилегающих территорий [10, 21]: **A** – модель современной динамики земной коры Балтийского щита, **B** – фрагмент разреза по профилю ГСЗ № 3; **IV** – отражение тектонического узла в структуре поверхности Мохоровичича: **A** – карта глубины залегания поверхности Мохоровичича Восточно-Европейской платформы (ВЕП) [25], **B** – карта «резкости» границы Мохоровичича ВЕП [25], выделены области (со значениями K более 0.9) с активизированными свойствами границы Мохоровичича, 1 – «след» тектонического узла; **V** – отражение тектонического узла в строении земной коры: **A** – карта мощности нижнего слоя земной коры ВЕП [25], **B** – карта мощности среднего слоя [25], **В** – карта мощности нижнего слоя [25], **Г** – скорость Р-волн на поверхности Мохоровичича [25], 1 – «след» тектонического узла; **VI** – отражение тектонического узла в характере потенциальных полей: **A** – глубина изотермы Кюри [24], **B** – карта аномального магнитного поля, нТ [25], **В** – карта аномалий силы тяжести в редукции Буге, мгал [25], **Г** – глубинные аномалии силы тяжести ВЕП [25], 1 – «след» тектонического узла; **VII** – геолого-геофизический разрез литосферы по 40° в.д. (хр. Гаккеля – Архангельск) [26]

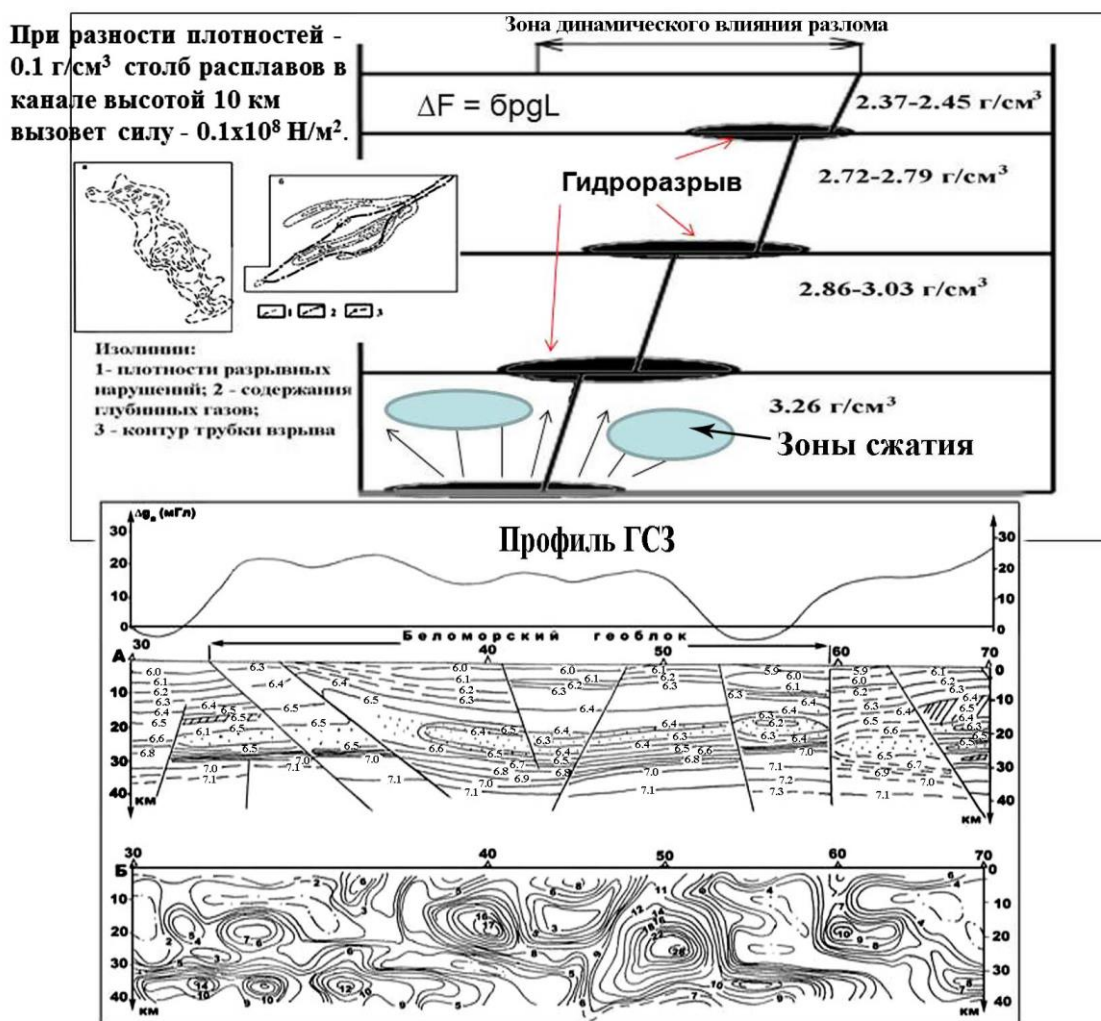


Рис. 8. Процесс развития тектонических структур за счет гидро- и магморазрыва

Разработанная авторами модель развития глубинных разломов говорит, что глубинность структур может быть значительно больше, но прослеживание разломов из-за их ступенчатого строения весьма затруднительно (см. рис. 8). Поэтому источник глубинной дегазации может находиться значительно глубже в земной коре региона, чем стандартно считается.

В разрезе разломы имеют не менее сложное строение не только внутренней структуры, но и в их пространственном расположении, связанным с физико-механическими свойствами разрываемых слоев («ступенчатое» строение и чередование преобладающих пластичных и хрупких деформаций). Такое строение разломов, как каналов миграции флюидов, подтверждает заключение Н.А. Кудрявцева: «Если

нефтепроявления встречены в каком-либо горизонте осадочного чехла, то они будут наблюдаться и ниже по всему его разрезу вплоть до кристаллического фундамента, а при наличии в последнем проницаемых зон – и в самом фундаменте» (цит. по [27, с. 143]).

В качестве частного случая этот механизм рассматривался при объяснении подъема с глубины кимберлитовых магм [28]. При этом было отмечено, что помимо избыточной силы ΔP при входе расплава или флюида в трещину (канал) с длиной L и сохранении условий меньшей плотности расплава по отношению к вмещающей среде (ρ_p) возникает дополнительная сила $\Delta F = \rho_p g L$, действующая с тем же знаком. Однако соотношение сил будет иным, если расплав по трещине внедряется в менее плотную среду. Тогда по мере подъема расплава начинает действовать и расти сила, обусловленная разностью плотности расплава и вмещающей среды и определяемая по величине приведенной выше формулой, но с отрицательным знаком. При разности плотностей -0.1 г/см^3 столб расплавов в канале высотой 10 км вызовет силу $-0.1 \times 10^8 \text{ Н/м}^2$. В таких условиях в окрестностях нижней границы слоя с меньшей плотностью вероятен разрыв стенок канала с образованием горизонтальных трещин растяжения. Образование последних обуславливается механизмом магморазрыва, сходного с гидроразрывом, при котором формируются преимущественно горизонтальные трещины. Таким образом, если поднимающийся из недр Земли относительно легкий материал переходит в расплав, то дальнейшее поведение последнего будет зависеть от соотношения плотностей жидкой фазы и твердой среды. В случае однородных пород менее плотные расплавы, если их избыточное давление превышает прочность среды, будут быстро подниматься по образующимся трещинам. Иная ситуация возникает, если в породах имеются соответствующие границы изменения плотности. Тогда поднимающиеся расплавы могут попасть в среду с меньшей плотностью (граница «фундамент – осадочный чехол»). В этом случае в основании слоя с меньшей плотностью возникнут трещины растяжения, по которым, учитывая пульсирующий характер внедрения, будут внедряться расплавы более поздних фаз согласно механизму гидроразрыва.

Таким образом, выделенный эмпирически критерий находит свое теоретическое подтверждение. Примеры таких структур достаточно широко известны не только в строении антиклинальных ловушек, но и в структурах кимберлитовых и базальтовых полей, ряда гидротермальных месторождений и т.п. Этот факт интересен и тем, что

близкое пространственное расположение кимберлитов, массивов базитов и нефтегазовых бассейнов неоднократно наблюдалось на практике.

Такое ступенчатое строение тектонических зон нефтегазовых месторождений наблюдается и по данным 3D сейсморазведки [29] (рис. 9).

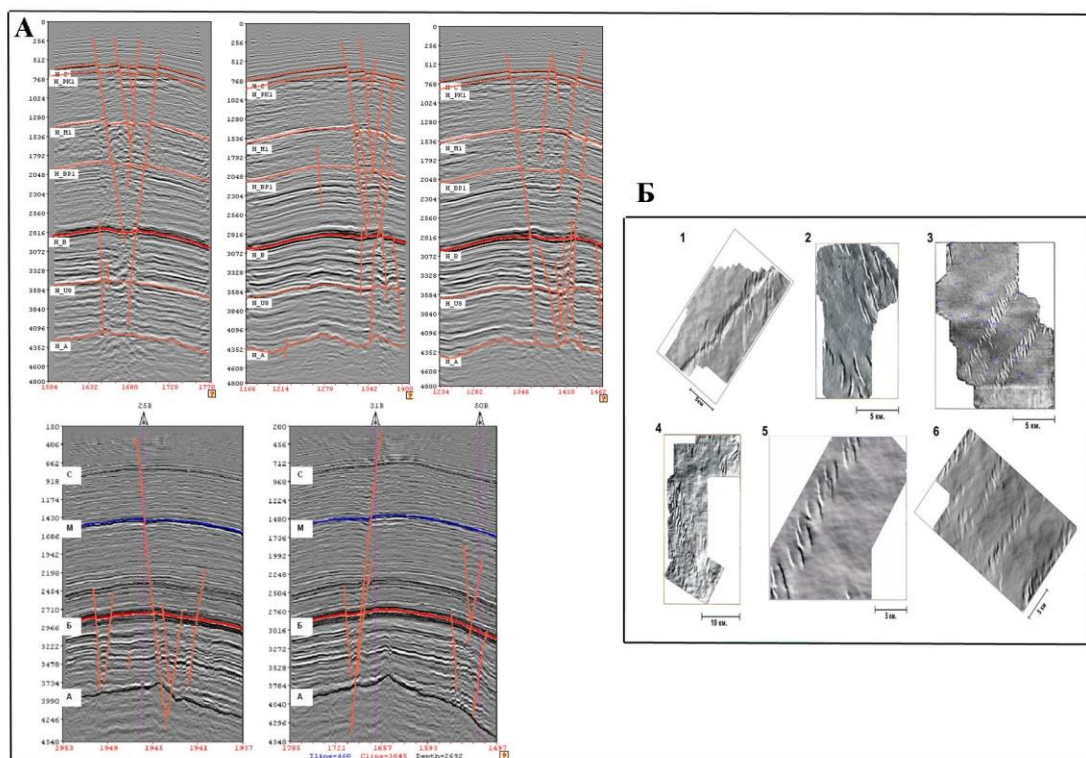


Рис. 9. Примеры ступенчатого строения тектонических зон нефтегазовых месторождений, полученного по данным 3D сейсморазведки [29]: А – цветковые структуры и сдвиговые зоны Западной Сибири на вертикальных сейсмических разрезах Еты-Пуровского (верхний ряд) и Вынгайхинского (нижний ряд) месторождений; Б – кулисное строение сдвиговых зон Западной Сибири на картах углов наклона по кровле баженовского горизонта верхней юры

Полученная модель позволяет говорить не только о большей глубине дегазации, обусловленной наличием надпорядкового тектонического узла, но и об изменении Р-Т условий в каналах дегазации и пространственных закономерностях размещения алмазоносных провинций в центре надпорядкового узла и нефтегазовых бассейнов на его периферии. Учитывая колебательный режим функционирования структур, можно предположить, что каналы дегазации будут «сквозными» и для осадочного чехла. Для тектонических узлов севера Русской плиты (рис. 10), которые функционировали в режиме чередования растяжения-сжатия, такой вариант весьма вероятен.

Однако, учитывая глинистый характер отложений венда, их мощность и широкое площадное распространение, вопрос этот нуждается в дальнейшем уточнении, так как в

ряде случаев тектоническое нарушение в определенном стратиграфическом горизонте может перерождаться в пликативные формы и являться флюидоупором.

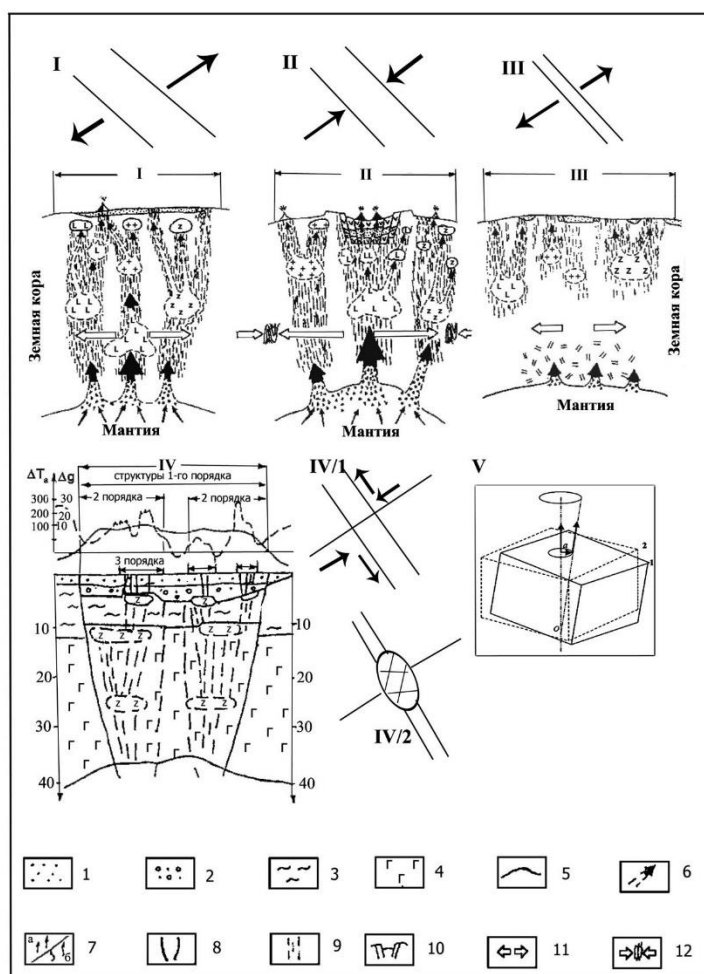


Рис. 10. Модель эволюции рифтогенных систем и тектонических узлов севера Русской плиты [18]: I–III – стадии развития: I – зарождение и созревание, II – активный рифтогенез, III – затухание; IV – палеозойская тектоно-магматическая активизация рифейского палеорифта: IV/1 – вендская активизация, IV/2 – образование вертикальной высокопроницаемой структуры (герцинский этап); V – современный этап: схема прецессии структурного блока земной коры; 1 – осадочные отложения; 2 – рифейские осадочно-вулканические отложения; 3 – гранитно-метаморфический слой; 4 – базальтовый слой; 5 – поверхность Мохо; 6 – высокопроницаемая вертикальная мантийная колонна; 7 – теплоток (а), флюидные потоки (в); 8 – конические разломы; 9 – зоны проницаемости (трещиноватости, разломы); 10 – осевые грабены; 11 – направление и интенсивность растяжения; 12 – зоны сжатия

С целью разделения тектонических узлов первого порядка по каждому из 18 узлов (см. рис. 5) были подготовлены векторные слои с полигонами границы периферии узла, всех промежуточных пересечений и центра узла. Далее по каждому полигону границы с помощью модуля SAGA GIS «Clip Grid With Polygon» из цифровой модели рельефа были вырезаны цифровые модели узлов и всех пересечений внутри узла. По авторским

методикам были проведены расчеты распределения высот рельефа, индекса расчлененности и углов наклона на площади тектонических узлов (см. рис. 11, А, Б, В). Полученные результаты носят предварительный характер и, в первую очередь, были нацелены на верификацию предложенной методологии и разработанных технических приемов ее реализации на практике.

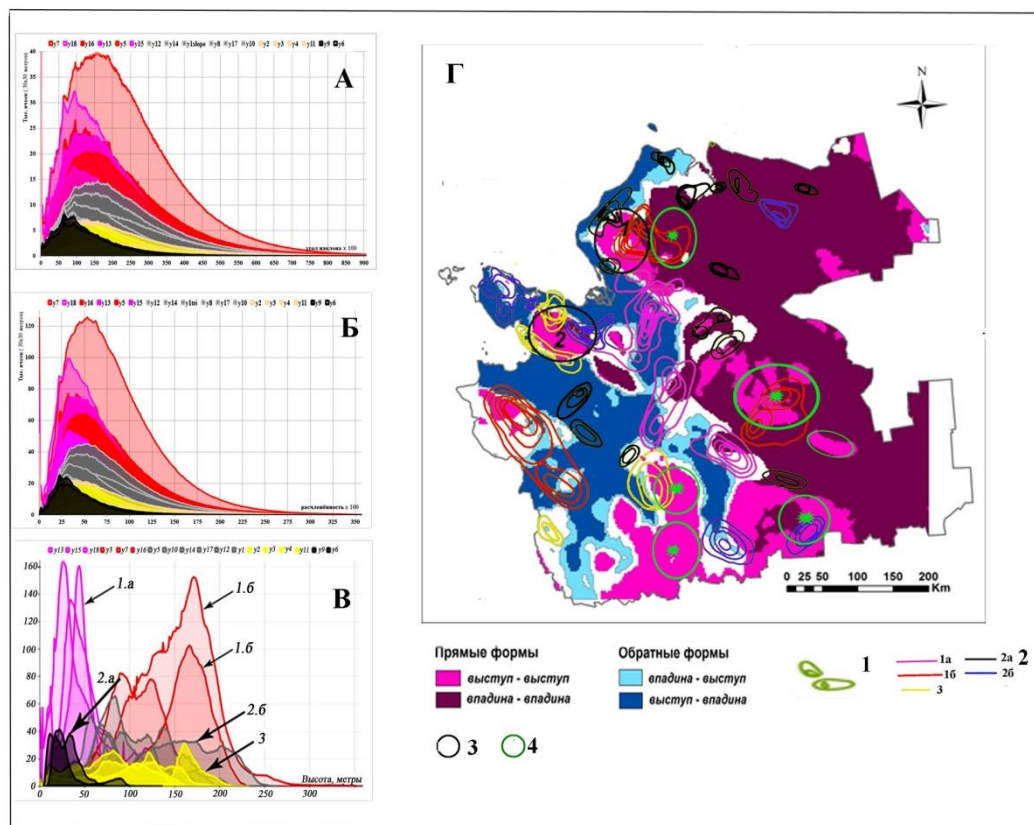


Рис. 11. Отражение районов кимберлитового магматизма и перспективных на обнаружение нефти и газа месторождений в цифровых моделях фундамента и современного рельефа:

А – характер распределения значений углов наклона на площади тектонических узлов; Б – характер распределения значений индекса расчлененности на площади тектонических узлов; В – распределение высот в тектонических узлах; Г – сопоставление форм наследования структур фундамента в современном рельефе и геоморфометрических параметров тектонических узлов с проявлениями кимберлитового магматизма и участками условной вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений по неотектоническим данным на площади Мезенской синеклизы: 1 – контур тектонического узла, 2 – группы тектонических узлов по характеру геоморфометрических параметров, 3 – проявления кимберлитового магматизма (1 – Зимнебережный кимберлитовый район, 2 – Ненокское поле мелилититов), 4 – участки условной вероятности встречи нефтяных и газовых месторождений по неотектоническим данным

По распределению значений высот узлы делятся на три группы (см. рис. 11, В). Первая группа – большая площадь узла (до 160 тыс. ячеек, размер ячейки 30x30 м), подразделяется на две подгруппы: 1а – высоты до 150 м, 1б – высоты до 350 м; вторая

группа – узлы средних размеров (средняя площадь узла до 60 тыс. ячеек), также подразделяется на две подгруппы: 2а – высоты до 100 м, 2б – высоты до 250 м; третья группа узлов – на площади до 20 тыс. ячеек показатель расчлененности изменяется от 0 до 1,75. Максимум (по площади) характеризуется показателем 0,5–0,75 и углами наклона склонов 1,5 градуса.

Распределение узлов по группам показано на рис. 11, Г. На первый взгляд, закономерности распределения групп узлов не просматривается. В то же время подгруппа 1а тяготеет к границе Онежского грабена, а подгруппа 1б – к крупным возвышенностям рельефа, испытывающим современное воздымание.

Распределение значений индекса расчлененности (см. рис. 11, Б) и углов наклона склонов (см. рис. 11, А) имеет одинаковый модальный характер распределения, что свидетельствует об однотипных процессах, в первую очередь эрозионных, на площади тектонических узлов. Однако при этом амплитуда значений по подгруппам различается (максимальные значения – у первой группы, минимальные – у подгруппы 2а). К подгруппе 1б относятся Зимнебережный кимберлитовый район и площади, перспективные на обнаружение кимберлитовых районов и полей по геохимическим данным; участки, перспективные на обнаружение нефти и газа в Мезенской синеклизе, также, в основном, относятся к подгруппе 1б.

Таким образом, на основе цифрового моделирования (по авторским методикам) проведены расчеты отражения структур кристаллического фундамента в современном рельефе (см. рис. 4, В) и геоморфометрических параметров тектонических узлов (см. рис. 11, А, Б, В).

Выводы

Результаты расчетов говорят о том, что проявления кимберлитового магматизма и площадей, перспективных на поиски нефти, приурочены к прямым формам отражения структур фундамента в современном рельефе, структурно характеризующимся как «выступ-выступ» (см. рис. 4, В и 11, Г); к подгруппе тектонических узлов 1б относятся Зимнебережный кимберлитовый район и площади, перспективные на обнаружение кимберлитовых районов и полей по геохимическим данным; участки, перспективные на обнаружение нефти и газа в Мезенской синеклизе, относятся к группе 1 (см. рис. 11, Г).

Полученные результаты позволяют разработать дополнительные поисковые признаки кимберлитового магматизма и нефтегазовых бассейнов.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания ФГБУН ФИЦКИА РАН «Изучение межгеосферных процессов в районах тектонических структур и узлов их пересечений в геологических условиях древних платформ на примере Архангельской области» (№ АААА-А18-118012390305-7) и при финансовой поддержке РФФИ-Арктика, проект № 18-05-60024.

Литература

1. Иотов В.И. Геодинамика, нефтегазоносность, проблемы геоэкологии Тимано-Печорской провинции (ТПП) // Север: экология: Сб. науч. трудов. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С. 190–205.
2. Объяснительная записка к Тектонической карте Баренцева моря и северной части Европейской России масштаба 1:2500000 / Под ред. Н.А. Богданова и В.Е. Хаина. М.: Изд-во ИЛ РАН, 1996. 94 с.
3. Иотов В.И., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Внутриплитный ротационно-сдвиговый механизм нелинейной геодинамики на нефтидогенез континентальных и шельфовых окраин юго-западного сектора Арктики // Геодинамика и геоэкология: Материалы Междунар. конф. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999. С. 152–154.
4. Тимурзиев А.И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтегазообразования и нефтегазонакопления // Геофизика. 2007. № 4. С. 49–60.
5. Никулин В.И. Методология прогноза районов эндогенной алмазности // Основные направления повышения эффективности и качества геологоразведочных работ на алмазы: Материалы Всесоюз. совещания. Иркутск, 1990. С. 155–157.
6. Клименко Н.Ф., Митюхин С.И. Глубинная структура Мало-Ботуобинского алмазносного района // Глубинное строение и полезные ископаемые Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1985. С. 33–37.
7. Суворов В.Д., Крейнин А.Б., Селезнев В.С. и др. Глубинные сейсмические исследования по профилю Олгуйдах-Мирный-Ленск // Геол. и геоф. 1983. № 9. С. 72–80.
8. Поспеев В.И., Никулин В.И. Выделение и оконтуривание кимберлитовых районов Западной Якутии по комплексу глубинных методов (ГМТЗ, ГСЗ, гравиметрия,

петрология) // Научные методы прогнозирования поисков и оценки месторождений алмазов. М.: ВИЭМС, 1980. С. 116–117.

9. *Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Разломно-блоковая тектоника и ее роль в эволюции литосферы // Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Геоэкологические проблемы / Под ред. Ф.Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 68–113.

10. *Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: ОАО «ИПП «Правда Севера»», 2004. 283 с.

11. *Кутинов Ю.Г., Полякова Е.В., Чистова З.Б., Минеев А.Л.* Отражение структур кристаллического фундамента Архангельской алмазоносной провинции в современном рельефе // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. М.: РУДН, 2017. Вып. 19. С. 514–518.

12. *Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б.* Нефть в породах фундамента и рифейских отложениях Мезенской синеклизы и юго-восточного склона Балтийского щита // Глубинная нефть. 2013. Т. 1, № 5. С. 620–637.

13. *Хуторской М.Д., Леонов Ю.Г., Ермаков А.В., Ахмедзянов В.Р.* Тепловой поток Свальбардской плиты: новые измерения – новые задачи [Электронный ресурс] // Северные территории России: проблемы и перспективы развития: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

14. *Белов С.В., Лапин А.В., Толстов А.В., Фролов А.А.* Минерагения платформенного магматизма (траппы, карбонаты, кимберлиты). Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. 537 с.

15. *Рябухина С.Г., Дмитриевская Т.В., Зайцев В.А.* Перспективы нефтегазоносности Мезенской синеклизы по неотектоническим данным // Геология нефти и газа. 1997. № 6. С. 16–21.

16. *Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В.* Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2015. № 3(21). С. 278–291.

17. Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Надежность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 4. С. 58–67. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>
18. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Комплексная модель процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах Севера Русской плиты // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2012. Т. 1. Вып. 1. Спец. вып. Система планета Земля. <http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t1v1/1109.php> (Дата обращения 12.02.2019).
19. Волчанская И.К., Сапожникова Е.И. Анализ рельефа при поисках месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 159 с.
20. Тектоно-магматические факторы концентрации оруденения / Под ред. М.А. Фаворской. М.: Наука, 1988. 231 с.
21. Кутинов Ю.Г. Чистова З.Б. Архангельская алмазоносная провинция на мелко-масштабных геологических, тектонических и геофизических картах // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 11. Вып. 1. Система планета Земля. http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/2227-9490e-aprov_r_e-ast11-1.2016.12.php (Дата обращения 12.02.2019).
22. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Неверов Н.А. Покомпонентные модели тектонических узлов. <https://regnum.ru/news/innovatio/2428428.html?t=1528450221> (Дата обращения 12.02.2019).
23. Лехи К., Тэйлор Р. Влияние глубинной структуры региона Глени на алмазы в кимберлитах Саскачевана // Геол. и геофиз. 1997. Т. 38, № 2. С. 451–460.
24. Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КАЭМ. 2003. 244 с.
25. Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с.
26. Шварцман Ю.Г. Тепловое состояние литосферы и новейшие измерения климата на Европейском Севере // Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 130–154.

27. *Галкин А.И.* Вклад Н.А. Кудрявцева в разработку глубинной гипотезы происхождения углеводородов и формирования залежей // История наук о Земле: исследования, этапы развития проблемы: Сб. материалов Междунар. науч. конф. М.: ИИЕТ РАН, 2008. С. 143.

28. *Сычев П.М.* Аномальные зоны в верхней мантии, механизм их образования и роль в развитии структур земной коры // Тихоокеан. геол. 1985. № 6. С. 25–35.

29. *Тимурзиев А.И.* Новейшая сдвиговая тектоника осадочных бассейнов: тектонофизический и флюидодинамический аспекты (в связи с нефтегазоносностью): Автореф. дисс. ... докт. геол. -минерал. наук. М.: МГУ, 2009. 40 с.

Numerical simulation of topography to predict areas prospective for oil and diamonds

Yu.G. Kutinov^{*}, Z.B. Chistova, E.V. Polyakova, A.L. Mineev

Federal Center for Integrated Arctic Research named by N.P. Laverov of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk
e-mail: *kutinov@fciarctic.ru

Abstract. On the basis of digital simulation (copyright methods) calculations in heritance the structures of crystalline basement in the modern relief and geomorphometric settings of tectonic nodes.

Based on the results of the calculations, the authors concluded that the manifestations of kimberlitic magmatism and promising areas for oil looking match with the direct forms of reflection structures of Basement in the modern relief («ledge-ledge») and to certain types of tectonic nodes.

Keywords: digital elevation model, geomorphometric parameters, oil, kimberlite.

Citation: Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V., Mineev A.L. Numerical simulation of topography to predict areas prospective for oil and diamonds // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art8> (In Russ.).

References

1. *Iotov V.I.* Geodynamics, oil-and-gas-bearing capacity, geoenvironmental problems of Timan-Pechora Province (TPP) // Northern ecology: Collected papers. Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 2000. P. 190–205. (In Russ.).
2. Explanatory note to Tectonic map of the Barents Sea and and the north of European part of Russia scaled at 1:2500000 / Ed. N.A. Bogdanov и V.E. Khain. Moscow: Institute of Litosphere RAS, 1996. 94 p. (In Russ.).
3. *Iotov V.I., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* Intraplate rotating and shearing mechanism of nonlinear geodynamics and naphtidogenesis of the continental margins and shelf edges of the South-Western sector of the Arctic // Geodynamics and geoecology: Proceedings of the international conference. Arkhangelsk: Institute for Ecological Problems of the North Ural Branch of the RAS, 1999. P. 152154. (In Russ.).
4. *Timurziev A.I.* New paradigm of oil and gas geology based on deep filtration model of fluid formation and accumulation // The Russian Geophysics Journal. 2007. No. 4. P. 49–60. (In Russ.).
5. *Nikulin V.I.* Methodology for predicting the regions of endogenous diamond-bearing // Main directions for improving the effectiveness and quality of diamond exploration and mining works: Proceedings of All-Union briefing. Irkutsk, 1990. P. 155–157. (In Russ.).

6. *Klimenko N.F., Mityukhin S.I.* Deep structure of Malo-Botuoba diamond-bearing region // Deep structure and mineral resources of the Soviet East. Novosibirsk: Nauka 1985. P. 33–37. (In Russ.).

7. *Suvorov, V. D., Kreinin, A. B., Seleznev et al.* Deep Seismic Investigations along the Olguidakh-Mirnyi-Lensk Profile // Russian Geology and Geophysics 1983. No. 9. P. 72–80. (In Russ.).

8. *Pospeev V.I., Nikulin V.I.* Detection and delineation of Kimberlite regions of Western Yakutia using a complex of geophysical methods (magnetotelluric sounding, deep seismic sounding, gravimetry, petrology) // Scientific methods for forecasting of exploration and evaluation of diamond deposits. Moscow: Institute for Economics of Mineral Resources, 1980. P. 116–117. (In Russ.).

9. *Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* Fault-block tectonics and its role in the evolution of the lithosphere // Lithosphere and hydrosphere of the north of European part of Russia. / Ed. F.N. Yudakhin. Yekaterinburg: Siberian Branch of the RAS, 2001. P. 68–113. (In Russ.).

10. *Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* Hierarchical range of manifestation of alkaline and ultra-alkaline magmatism of the Arkhangelsk diamond province. Their manifestation in geological and geophysical data. Arkhangelsk: Pravda Severa, 2004. 283 p. (In Russ.).

11. *Kutinov Yu.G., Polyakova E.V., Chistova Z.B., Mineev A.L.* Reflections of the structures of crystalline basement of Arkhangelsk diamond bearing province in modern relief // E.M. Sergeev commemoration conference. Engineering geology and geocology. Geoenvironmental safety of the development of mineral deposits. Moscow: People's Friendship University, 2017. Iss. 19. P. 514–518. (In Russ.).

12. *Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* Oil in rocks of the basement and Rhiphaean sedimentary of Mezen sineclise and a southeast slope of the Baltic shield // *Glubinnaya Neft'*. 2013. Vol. 1, No. 5. P. 620–637. (In Russ.).

13. *Khutorskoy M.D., Leonov Yu.G., Ermakov A.V., Akhmedzyanov V.R.* Thermal flux of the Svalbard platform: new investigations – new tasks // Northern territories of Russia: problems and prospects of development: Proceedings of All-Russian conference with international participation. Arkhangels: Institute of Ecological Problems of the North, Ural Branch of the RAS, 2008. – Available on CD. (In Russ.).

14. *Belov S.V., Lapin A.V., Tolstov A.V., Frolov A.A.* Minerageny of platform magmatism (traps, carbonatites, kimberlites). Novosibirsk: Siberian Branch of the RAS Publ. 2008. 537 p. (In Russ.).
15. *Riabukhina S.G., Dmitrievskaya T.V., Zaitsev V.A.* Oil and gas prospects of the Mezensky syncline by neotectonic data // *Oil and Gas Geology*. 1997. No. 6. P. 16–21. (In Russ.)
16. *Mineev A.L., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V.* Preparation of a digital elevation model for the study of exogenous processes in the northern territories of the Russian Federation // *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2015. No. 3(21). P. 278–291. (In Russ.).
17. *Mineev A.L., Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* The reliability of a digital elevation model of the Arkhangelsk Region for geocological research // *Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2018. Vol. 15, No. 4. P. 58–67. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67>. (In Russ.).
18. *Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* Complex model of geospheres interaction processes in the tectonic nodes at the north of Russian Plate // *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2012. Vol. 1. Iss. 1. Special issue. Earth planet system. <http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t1v1/1109.php> (Accessed on 12.02.2019). (In Russ.).
19. *Volchanskaya I.K., Sapozhnikova Ye.N.* Analysis of relief when searching for mineral deposits. Moscow: Nedra, 1990. 159 p. (In Russ.).
20. Tectonic-magmatic factors of mineralization concentration / Ed. M.A. Favorskaya. Moscow.: Nauka, 1988. 231 p. (In Russ.).
21. *Kutinov Yu.G., Chistova Z.B.* Small-scale geological, tectonic and geophysical mapping of arkhangelsk diamondiferous province // *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2016. Vol. 11. Iss. 1. Earth planet system. http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/2227-9490e-apovr_e-ast11-1.2016.12.php (Accessed on 12.02.2019). (In Russ.).
22. *Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Belyaev V.V., Neverov N.A.* Component-based models of tectonic centers. <https://regnum.ru/news/innovatio/2428428.html?t=1528450221> (Accessed on 12.02.2019). (In Russ.).

23. *Leahy K., Taylor W.R.* The influence of the Glennie Domain deep structure on the diamonds in Saskatchewan kimberlites // *Geology and Geophysics*. 1997. V. 38, No. 2. P. 451–460. (In Russ.).

24. *Glaznev V.N.* Complex geophysical models of Fennoscandia lithosphere. Apatity: K&M. 2003. 244 p. (In Russ.).

25. *Yudakhin F.N., Shchukin Yu.K., Makarov V.I.* Deep structure and modern geodynamic processes in the lithosphere of the East European platform. Yekaterinburg: Siberian Branch of the RAS, 2003. 299 p. (In Russ.).

26. *Shvartsman Yu.G.* Thermal condition of lithosphere and recent climate measurements in the north of European part of Russia // *Lithosphere and hydrosphere of the north of European part of Russia*. Yekaterinburg: Siberian Branch of the RAS, 2001. P. 130–154. (In Russ.).

27. *Galkin A.I. N.A. Kudryavtsev's* contribution to development of the hypothesis of the deep origin of hydrocarbons and oil and gas deposits formation // *History of the Earth sciences: studies, stages of research: Proceedings of international scientific conference*. Moscow: Institute for History of Science and Technology RAS 2008. P. 143. (In Russ.),

28. *Sychev P.M.* Anomalous zones in the upper mantle, mechanism of formation and their role for the Earth's crust structures development // *Russian Journal of Pacific Geology*. 1985. No 6. P. 25–35. (In Russ.).

29. *Timurziev A.I.* Recent fault tectonics of sedimentary basins: tectonophysical and fluidodynamic aspects (with regard to oil-and-gas-bearing capacity): Synopsis of doctoral thesis. Moscow: MSU, 2009. 40 p. (In Russ.).