УДК 551.64

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ МЕЖГЕОСФЕРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ТЕКТОНИЧЕСКИХ УЗЛАХ СЕВЕРА РУССКОЙ ПЛИТЫ

© 2022 г. Ю. Г. Кутинов[1]*, З. Б. Чистова[1], А. Л. Минеев,[1]
Е. В. Полякова[1], Н. А. Неверов[1]

[1]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН, Архангельск, Россия

**E-mail: kutinov@fciarctic.ru*

Авторами были проведены исследования 18 тектонических узлов первого порядка на площади Архангельской области. В состав исследований входили: анализ геолого-геофизических материалов; цифровое моделирование рельефа кровли фундамента и поверхности современного рельефа. Мониторинговые наблюдения количественных характеристик абиогенных (электромагнитная эмиссия, атмосферное давление, подток глубинных газов, скорость выпадения твердых и жидких осадков и т.п.) и биогенных (структура и состав растительного покрова, содержание химических элементов в почвах и растительном покрове) процессов в тектонических узлах были проведены на 6 тектонических узлах. Привлекались также данные сейсмотомографии по территории Канадской алмазоносной провинции для уточнения глубинного строения узлов. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что глубинность тектонических узлов имеет 400 и более километров. Они отражаются в пониженных значениях температуры в литосфере и астеносфере 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 слоев земной коры; в современном геодинамическом режиме, в макросейсмическом поле, дегазации и ионизации атмосферы (вплоть до ионосферы). Строение тектонических узлов имеет фрактально-подобную (древовидную) структуру, схожую со структурой адвективных поднятий и диапиров мантийных астенолитов. На площади тектонических узлов наблюдается корреспондирование структуры глубинных слоёв земной коры в фундаменте, осадочном чехле и современном рельефе, а также в структуре и свойствах растительного покрова. Эти процессы объясняются геодинамическими процессами, глубинной дегазацией и возникновением наведенных магнитотеллурических токов в земной коре. Межгеосферное взаимодействие в районах тектонических узлов отражается в состоянии растительного покрова, и в процессах в атмосфере. В результате измерений атмосферного давления над тектоническими узлами установлен факт постоянного «дефицита» атмосферного давления и зафиксированы повышенная плотность гроз и искажение сигналов GPS и сотовой связи. Данное научное направление имеет прогностическое значение при геоэкологических исследованиях. Полученные результаты важно учитывать при геоэкологических исследованиях разного масштаба и мониторинге современных геоэкологических рисков.

Ключевые слова: Север Русской плиты, тектонические узлы, межгеосферное взаимодействие, литосфера, биосфера, атмосфера.

Для цитирования: *Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Минеев А.Л., Полякова Е.В., Неверов Н.А.* Результаты мониторинговых исследований процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах севера Русской плиты // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 10–24. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_10

Введение

В последние десятилетия в научной литературе приводятся многочисленные данные о воздействии тектонических структур на состояние окружающей среды. Тем не менее, исследования

межгеосферных процессов, происходящих в области развития тектонических нарушений и, особенно, узлов их пересечений на настоящий момент развиты пока слабо. Большинство сообщений посвящено проявлению этих процессов в геодинамически активных структурах и в значительно меньшей степени для платформенных территорий. Обычно основное внимание уделяется процессам, происходящим в земной коре, в меньшей мере в атмосфере, и практически не исследуются взаимодействия геосфер на границе литосфера-биосфера.

Целью данного исследования было изучение межгеосферных процессов в узлах тектонических нарушений на площади древних платформ на примере севера Русской плиты (Архангельская область).

Архангельская область была выбрана в качестве эталонного участка для приарктических территорий РФ. Выбор был обусловлен следующими факторами. В геологическом отношении: 1) она относится к Восточно-Европейской древней платформе и может быть сопоставлена с Восточно-Сибирской платформой; 2) входит в область динамического влияния зоны Арктического спрединга [Кутинов, 2021], что показано на рис. 1, и, как следствие, имеет сходный современный геодинамический режим; 3) имеет общие геохимические характеристики земной коры [Кутинов, 2005].

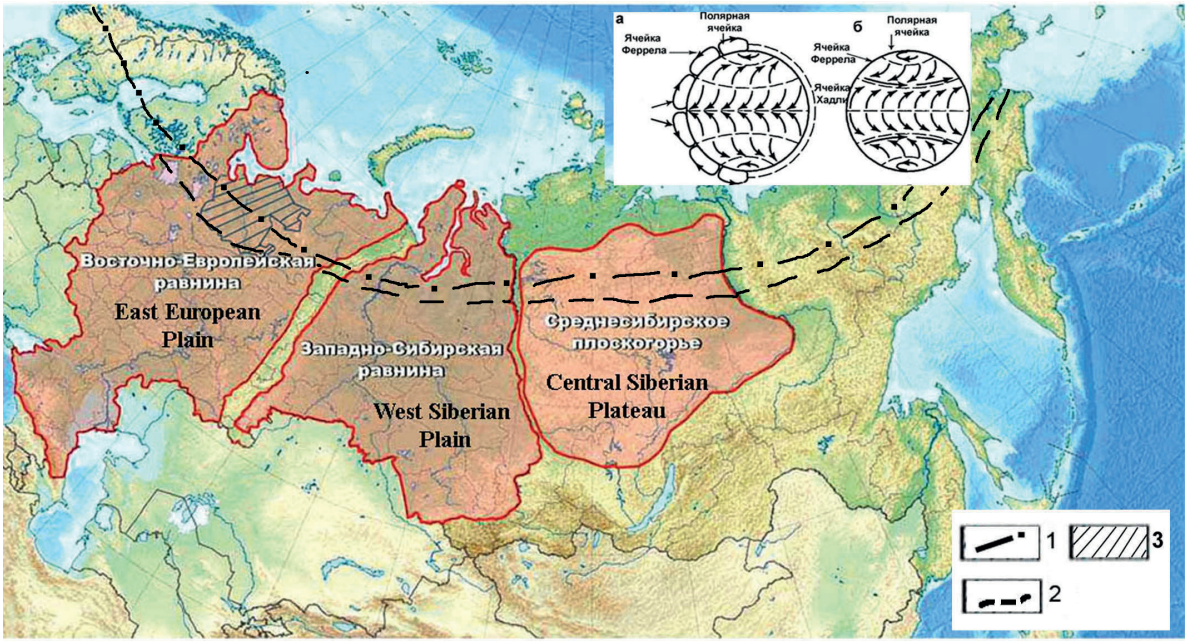

Рис. 1. Карта рельефа России с дополнительными элементами: 1 – генерализованная граница между Полярной климатической ячейкой и ячейкой Феррела; 2 – генерализованная граница области динамического влияния Арктической зоны спрединга [по: Кутинов, 2021]; 3 – территория Архангельской области. На вставке глобальная схема ветров и атмосферные ячейки циркуляции: а – направление ветров у поверхности, б – в верхней части тропосферы

В геоморфологическом отношении территория Архангельской области входит в состав Русской равнины, и по геоморфометрическим параметрам сопоставима с Западно-Сибирской равниной [Бронгулев и др., 2004] и Среднесибирским плоскогорьем (рис. 1). Суммарно эти структуры занимают около 2/3 территории РФ. Климатически она входит в состав Полярной климатической ячейки и ячейки Феррела (показано на рис. 1). Ячейка Феррела (Феррреля) – элемент циркуляции земной атмосферы в умеренном поясе, находится примерно между 30° и 65° с.ш. и 30° и 65° ю. ш. и ограничена Полярной ячейкой с севера и ячейкой Хадли с юга [Погода и климат, 1988]. Ячейка Феррела считается второстепенным циркуляционным элементом и полностью зависит от ячейки Хадли и Полярной ячейки. Т.е. ячейка Феррела действует как зона перемешивания между ячейкой Хадли и Полярной ячейкой и характеризуется неустойчивым климатом. Неустойчивость климатических параметров, наряду с другими факторами, влияет на интенсивность и характер протекания экзогенных процессов. Т.е. появляется возможность распространить полученные результаты на приарктические территории РФ.

Материалы и методика работ

На первом этапе были выделены тектонические узлы первого порядка. Порядок тектонических узлов определялся их площадными размерами, глубинностью по данным сейсморазведочных работ [Кутинов, Чистова, 2016] и рангом образующих их тектонических структур [Билибина, 1986]. При выделении узлов использовались все имеющиеся на настоящий момент геолого-геофизические материалы м-ба 1:1000000–1:50000. Методика выделения узлов подробно рассмотрена в более ранних работах авторов [Кутинов и др., 2020а,б]. Алгоритм их выделения показан на рис. 2.

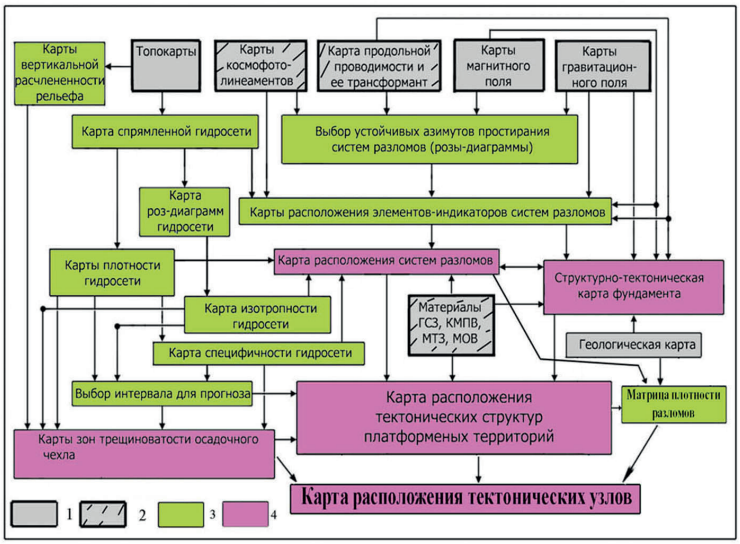

Рис. 2. Алгоритм выделения систем разломов и тектонических узлов: 1–2 – архивные материалы [Кутинов и др., 2019б]: 1 – имеющиеся для всех территорий древних платформ, 2 – не всегда имеющиеся; 3–4 – карты и материалы, получаемые в процессе исследований: 3 – промежуточные, 4 – окончательные

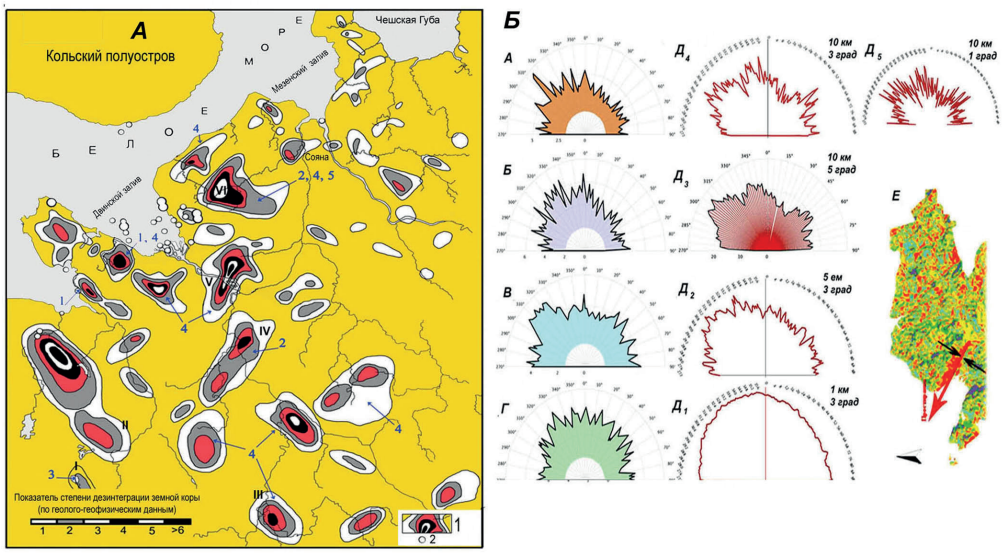

Рис. 3. Пространственное размещение тектонических узлов региона и розы-диаграммы элементов индикаторов разломов: А – Схема размещения тектонических узлов [Кутинов и др., 2020а]. Римские цифры на схеме – название узлов, на которых были проведены мониторинговые исследования: I – Лекшмозерский, II – Кенозерский (Плесецкий), III – Вельско-Устьянский, IV – Емецкий, V – Холмогорский, VI – Зимнебережный. Арабские цифры на схеме: 1 – места гибели морских звезд, 2 – места повышенной дихотомии деревьев и повышенного содержания тяжёлых металлов в коре деревьев, 3 – места массовой гибели рыб, 4 – участки с повышенным содержанием тяжелых металлов в почвах, 5 – участки изменения структуры растительного покрова:1 – изолинии плотности тектонических нарушений, 2 – очаги землетрясений; Б – Сопоставление роз-диаграмм элементов-индикаторов разломов региона (обработка данных масштаба 1:200000) с экспозицией склонов, пересчитанной в значения их простирания [Кутинов и др., 2020б]: А – поля силы тяжести, Б – магнитного поля, В – космофотолинеаментов; Г – гидросети: Д1-5 – розы-диаграммы – результат пересчета с разными окнами и осреднениями экспозиции склонов в простирание склонов; Е – алгоритм пересчета экспозиции склонов в простирание

Всего было выделено 18 узлов, отличающихся друг от друга морфометрическими характеристиками (рис. 3А). Проведённое сопоставление простираний тектонических нарушений с экспозицией склонов (рис. 3Б) показало наличие отражения тектонических структур региона в современном рельефе. В большинстве ГИС-программ нет расчета простирания склонов, есть только расчет их экспозиции. Поэтому нам пришлось по авторской программе сделать такой пересчет. Сопоставление роз-диаграмм показало также, что оптимальным для экспозиции является окно 10 × 10 км. Поэтому в дальнейшем анализ был дополнен геоморфометрическими расчётами по подготовленной нами цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER GDEM v2 [Кутинов и др., 2019а].

Для изучения межгеосферного взаимодействия на площади тектонических узлов необходимо было получить наиболее полные характеристики узлов не только на уровне литосферы, но и современного рельефа, биосферы и атмосферы. Для этого нами была разработана методика, состоящая из трех крупных блоков (рис. 4), условно названных нами «геоморфометрическим», «экзогенным» и «эндогенным».

Дальнейшее изложение материалов приведено согласно вышеперечисленным блокам. Расчёт геоморфометрических параметров рельефа проводился по подготовленной нами гидрологически корректной цифровой модели на основе ЦМР ASTER GDEM v2 (пространственное разрешение 1 угл. сек, 12734342 ячеек) в программной среде SAGA GIS. Подготовка включала в себя замену аномальных значений, заполнение «пустот», удаление ошибок, гидрологическую коррекцию [Кутинов и др., 2019а] и проверку точности полученной модели [Минеев и др., 2018].

Перечень используемых для анализа параметров, формулы их расчета показаны в таблице, последовательность анализа отображена на рис. 4. При этом так как методика геоморфометрического анализ территории была подробно рассмотрена в двух предыдущих монографиях [Кутинов и др., 2019а; 2020,б], то в данной статье она не рассматривалась.

Рис. 4. Алгоритм изучения межгеосферных процессов

Для учета эндогенных факторов нами был применен итерационный подход – от глобального до локального уровней, т.к. методически правильнее решать эту задачу идя сверху вниз, но это в первую очередь связано с весьма неоднозначным выбором региональной модели и, особенно, ее ограничений

Таблица 1

Параметр	Формула	Параметр	Формула
1	2	3	4
Геоморфометрические параметры [Минеев и др., 2017]			
Уклон поверхности	$SLOPE = \arctan\left(\sqrt{G^2 + H^2}\right)$	Экспозиция склонов	$ASPECT = 180° - \arctan\left(\frac{H}{G}\right) + 90° \times \left(\frac{G}{\lvert G\rvert}\right)$
Кривизна	Горизонтальная $PlanC = -\frac{(2EG^2 + 2DH^2 - 2FGH)}{(G^2 + H^2)^{1.5}}$ Вертикальная $ProfC = -\frac{(2DG^2 + 2EH^2 + 2FGH)}{(G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{1.5}}$	Индекс расчлененности рельефа	$TRI = \sqrt{\sum (h_{0,0} - h_{i,j})^2}$
Водосборная площадь	$f_i = \frac{\max(0, Slope_i^p)}{\sum_{j=1}^{8}(\max(0, Slope_j^p))}$	Топографический индекс влажности	$TWI = \ln\left(\frac{A}{\tan(\beta)}\right)$
Индекс мощности эрозии	$SPI = A \cdot \tan(\beta)$	Индекс потенциала плоскостной эрозии	$LS = \left(\frac{As}{22.13}\right)^m \times \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^n$
Индекс баланса геомасс	$MBI = f(TC) \times (1 - f(S)) \times (1 - f(VDN))$, для $f(TC) < 0$ $MBI = f(TC) \times (1 + f(S)) \times (1 + f(VDN))$, для $f(TC) > 0$ где $f(x) = \frac{x}{\lvert x\rvert + F}$	Фотосинтетически активная радиация (ФАР)	$ФАР = 0.42 \cdot S + 0.60 \cdot D$
Экзогенные факторы			
Потенциальная энергия рельефа	$U_0 = 0.5\rho g \Delta S \sum_i^M h_i^2 n_i$		
Эндогенные факторы [Кутинов, 2021, Кутинов и др., 2021]			
Вектора скольжения горных масс	$R = \sqrt{2 \cdot \sin\left[\frac{1}{2}(90° - e°)\right]}$	Тензоры деформации	$\varepsilon_{xx} = \sin^2\varphi_t \times \sin^2\alpha_t - \sin^2\varphi_e \times \sin^2\alpha_e$ $\varepsilon_{yy} = \sin^2\varphi_t \times \cos^2\alpha_t - \sin^2\varphi_e \times \cos^2\alpha_e$ $\varepsilon_{zz} = \cos^2\varphi_t - \cos^2\varphi_e$
Коэффициент Лоде-Надаи	$\mu_\varepsilon = 2\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} - 1$	Коэффициент дискретности	$K_{ñð} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} K_i\right)$

Продолжение Таблицы 1

Удельная энергоемкость блоков	$W_{эс} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3(3M - E)}{ME} (\rho g H)^2 + \frac{1}{2M} \cdot \left(\frac{E_c}{V_{or}} \right)^2$	Функция «блочности»	$f(B) = \frac{1}{2} \ln^2 B$

[Кутинов, Чистова, 2004]. В ходе исследования был проведен анализ геолого-геофизических данных на глобальном (Арктический сегмент земной коры) [Кутинов, 2021], региональном (Балтийский щит и Русская плита) и локальном (тектонические узлы) уровнях [Кутинов, Чистова, 2020]. Для учёта влияния межплитной тектоники были рассчитаны вектора скольжения горных масс в очагах землетрясений, 3-х деформаций первого рода и коэффициент Лоде-Надаи. Формулы расчетов приведены в таблице. Более подробное описание применения формул расчета геоморфометрических параметров приведено в более ранних работах авторов [Минеев и др., 2017; Кутинов и др., 2019а].

Был сделан вывод, что для земной коры региона характерен режим объемного сжатия, сложное слоисто-блоковое строение с чередованием режимов растяжения и сжатия [Кутинов, Чистова, 2020], поле горизонтальных напряжений имеет волновой периодичный характер [Юдахин и др., 2008]. Тектонические нарушения региона в современном виде сформировались в результате многочисленных актов тектоно-магматической активизации [Савицкий и др., 1986] и приложения сил разной природы и масштаба воздействия [Кутинов, Чистова, 2020]. Одним из основных факторов разломообразования на севере Русской плиты является близость воздымающегося Балтийского кристаллического щита. Учитывая наличие в земной коре волноводов («компетентных» и «некомпетентных» слоев) [Леонов, 1997], возможно образование складок продольного изгиба не только в гранито-гнейсовом слое [Кисин, Коротеев, 2016], но и в осадочном чехле территории.

Для выделения структур продольного изгиба по авторской методике был проведен анализ отражения структур фундамента в современном рельефе [Кутинов и др., 2020б]. Для этого нами было введено понятие абсолютной разницы нормированных значений матриц высоты земной поверхности и глубины залегания фундамента по формуле (1):

$$M^{abs} = \left| MF_n - MR_n \right| \quad (1)$$

Данные о глубине залегания кровли фундамента получены по материалам отчета из фондов Архангельского филиала ФБУ «ТФГИ по СЗФО» [Составление карт.., 1988], т.к. при ее создании использовались все имеющиеся на площади региона профили ГСЗ (5 профилей), профили КМПВ (более 20), а также был произведен расчет регрессии по сейсморазведочным и гравиметрическим данным (всего 48 профилей). Таким образом, была создана равномерная сеть определений глубины залегания фундамента, позволяющая создавать площадную цифровую модель, и отойти от профильных расчетов. Для создания цифровой модели глубины залегания кровли фундамента использовалось программное обеспечение ESRI ArcGIS 10.3 с применением модуля Spatial Analyst из линейки инструментов ArcToolBox.

Далее, комбинируя значениями матриц разности и суммы, исследуемая территория была разделена по формам отражения структур фундамента в дневном рельефе на следующие классы: 1) выступ-выступ; 2) впадина-впадина; 3) впадина-выступ; 4) выступ-впадина (рис. 5А, 5Б, 5Г) и подсчитаны их статистические параметры.

Для характеристики мегаблоков и трансблоковых зон земной коры, к которым приурочены тектонические узлы, были рассчитаны: коэффициент дискретности земной коры, энергоемкость, плотность разломов, функция «блочности». Формулы расчетов приведены в таблице, описание математических подходов и методик расчета рассмотрены в одной из работ авторов [Кутинов и др., 2021].

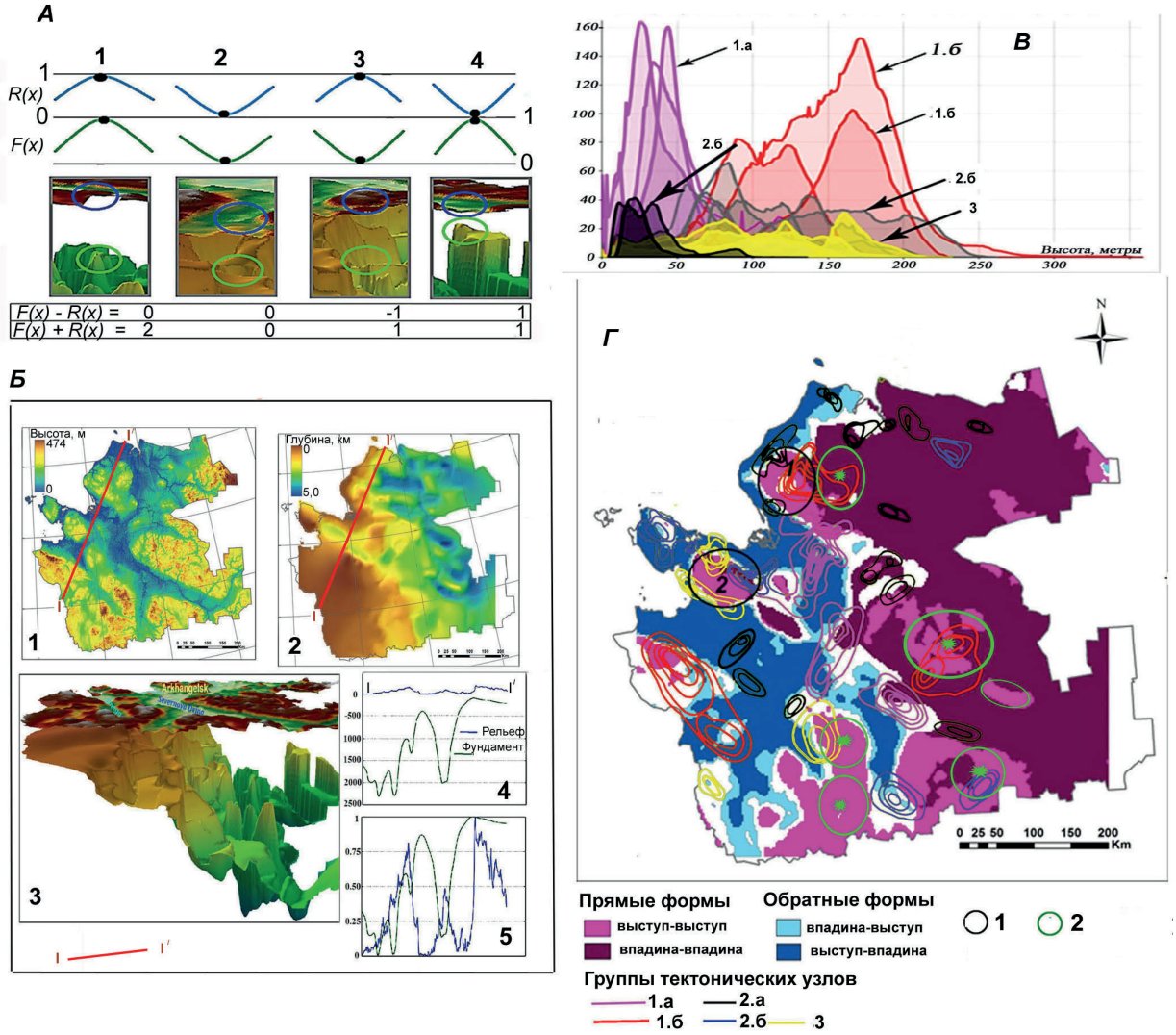

Рис. 5. Алгоритм анализа отражения структур фундамента в современном рельефе и разделения узлов по высотным оценкам [Кутинов и др., 2019а,б; Полякова и др., 2019]: А – разность и сумма нормированных значений функций: 1, 2 – прямые (повторяющиеся), 3, 4 – обратные (противоположные) формы; Б – пример нормирования значений высот рельефа дневной поверхности и глубин фундамента по профилю I–I′: 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 I–I′. Расчетный профиль показан линией красного цвета; В – распределение высот в группах тектонических узлов: 1 – узлы большой площади, высоты: 1а – до 150 м, 1б – до 350 м; 2 – узлы средней площади, высоты: 2а – до 100 м, 2б – до 250 м; 3 – узлы малой площади; 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 – районы кимберлитового магматизма: 1 – Зимнебережный кимберлитовый район, 2 – Ненокское и Белозерское поля мелилититов и кимберлитов; 2 – районы вероятных локализаций нефтяных и газовых месторождений

На более детальном уровне было проведено разделение всех выделенных 18 тектонических узлов (рис. 3А) по характеру площадного распределения высотных отметок рельефа (рис. 5В, 5Г), индекса расчлененности и углов наклона. Информативным оказался такой параметр, как распределение высотных отметок, значения индекса расчлененности и углов наклона имеют мономодальное распределение, что говорит о разнонаправленности разломов, слагающих тектонические узлы.

Для учета экзогенных факторов, показанных на рис. 4 были рассчитаны базисные, разностные и вершинные поверхности (4–10 порядков); потенциальная энергия рельефа и плотность облачности в

программном обеспечении в SAGA GIS. Расчет поверхностей проводился по общепринятой методике [Чернова и др., 2010], адаптированной нами для SAGA GIS. Для расчета облачности использовались данные спутников Sentinel-2; Landsat 8 Collection 1 calibrated top-of-atmosphere (TOA) reflectance и Sentinel-5P TROPOMI. Наиболее корректными были данные Sentinel-5P TROPOMI, т.к. имеют гораздо больший охват территории, и снимки содержат данные о доли облачности в каждом пикселе. Пример полученных результатов показан на рис. 6.

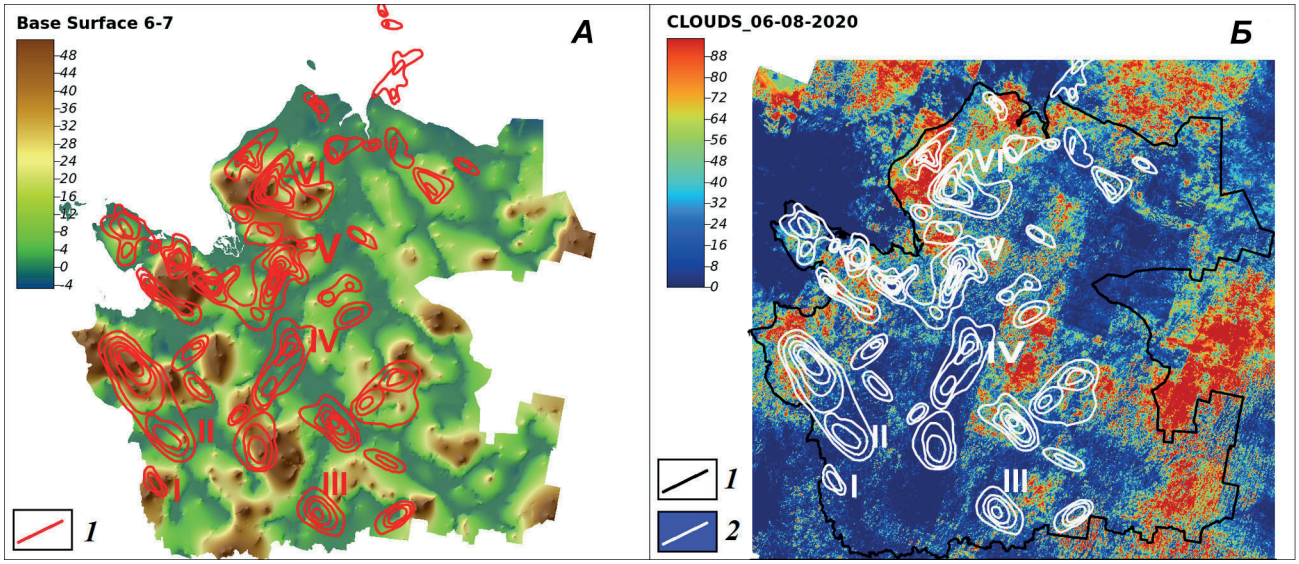

Рис. 6. Примеры расчета разностных поверхностей и облачности: А – карта разности базисных поверхностей 6–7: 1 – тектонические узлы; Б – медианная вероятность облачности над территорией Архангельской области за период с июня по август 2020 г.: 1 – граница Архангельской области, 2 – тектонические узлы. Римские цифры – описание см. рис. 3А

Потенциальная энергия рельефа была рассчитана для Зимнебережного тектонического узла, т.к. эта территория наиболее детально изучена геолого-геофизическими методами масштаба 1:25000–1: 50000 (район проявления кимберлитового магматизма). Уровень расчета был принят равным 0 (поверхность океана).

Значения плотности пород для расчета потенциальной энергии рельефа были приняты из средневзвешенных значений, характерных для литолого-физических зон исследуемого региона [Кутинов, Чистова, 2004] (рис. 7Б).

Алгоритм расчета и полученные результаты показаны на рис. 7А и рис. 7В.

Мониторинговые исследования были проведены на 6 тектонических узлах, показанных на рис. 3А римскими цифрами. Исследования проводились в центре, на периферии и за пределами тектонических узлов. Исследовались следующие параметры абиогенных факторов: структура барического поля (атмосферное давление и плотность облаков); частота и количество выпадающих жидких и твердых осадков; частота гроз; прохождение сигнала сотовой связи; искажение сигнала GPS, содержание кислорода в приповерхностном слое атмосферы; плотность потока радона (ППР) на поверхности грунта в различных ландшафтных условиях; содержание O_2, CO_2, CH_4 на площади Холмогорского тектонического узла; содержание микроэлементов в почвах.

Из биогенных факторов исследовались: структура и разнообразие растительного покрова; урожайность дикорастущих ягодников (морфологические замеры кустарничков и их плодов); содержание минеральных питательных элементов в ягодах, мхах и лишайниках; физико-механические свойства древесины и т.п. Пробные площади для изучения биоты (центр узла, периферия, контроль) выбирались в сходных ландшафтных условиях. Методика исследований была подробно изложена в ряде публикаций [Кутинов и др., 2018; 2020].

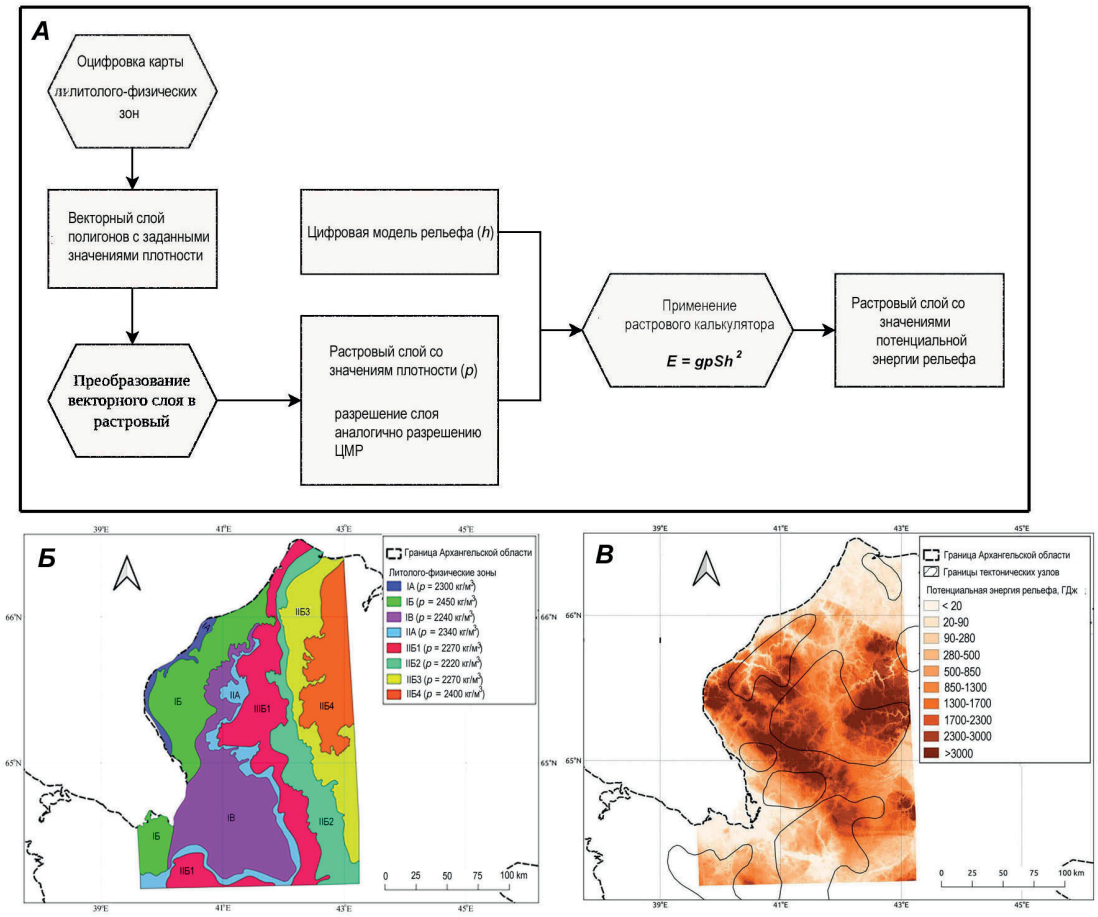

Рис. 7. Расчет энергии рельефа: А – алгоритм расчета значений потенциальной энергии рельефа на основе цифровой модели рельефа средствами SAGA GIS; Б – литолого-физические зоны [по: Кутинов, Чистова, 2004]; В – потенциальная энергия рельефа

Результаты работ и обсуждение

Анализ эндогенных факторов показал, что тектонические нарушения исследуемого региона (разломы) являются нарушениями со смещением слоев в теле фундамента, а в осадочном чехле им обычно соответствуют узкие зоны трещиноватости и флексурообразные перегибы. [Кутинов, Чистова 2004; 2012]. Как отмечалось выше, тектонические нарушения региона в современном виде сформировались в результате многочисленных актов тектоно-магматической активизации и приложения сил разной природы и масштаба воздействия (от межплитной зоны спрединга, до локальных геодинамических структур) [Кутинов, Чистова, 2020]. Причем, воздействие со стороны спрединга имеет волновой, периодичный характер с различными периодами [Юдахин и др., 2008], которые регулярно «возбуждают» тектонические нарушения.

Такой колебательный характер воздействия, особенно на тектонические узлы, сформированные разнонаправленными тектоническими нарушениями, должен сопровождаться глубинной дегазацией, подъемом минерализованных вод и возникновением наведенных магнитотеллурических токов, воздействующих на состояние атмосферы. Т.е. в структурах тектонических узлов наблюдается пространственно-временная смена режимов растяжения и сжатия [Кутинов, Чистова, 2012]. Анализ значений коэффициента дискретности, удельной энергоемкости и функции «блочности» показал, что практически все исследованные узлы относятся к Беломорскому мегаблоку и Балтийско-Мезенской трансблоковой зоне, которые характеризуются повышенными значениями коэффициента расчлененности (2.64) и удельной энергоемкости (22–24) × 10 Дж/м^3) [Кутинов др., 2021]. Таким

образом, эти структуры отличаются повышенной проницаемостью земной коры и находятся, в т. ч. и тектонические узлы, в колебательном режиме с меняющимся напряженно-деформированным состоянием. Анализ разностных моделей свидетельствует о наличии подвижек земной коры и на современном тектоническом этапе (рис. 6А), причём тектонические узлы пространственно совпадают с максимальными значениями разностных поверхностей (рис. 6А).

Переходя к результатам мониторинговых наблюдений на площади тектонических узлов, следует отметить, что результаты авторами излагались в многочисленных публикациях. Наиболее полно они отражены в работах [Кутинов и др., 2018; 2020б]. Вкратце, результаты выглядят следующим образом. В атмосфере зафиксированы: 1) постоянный «дефицит» атмосферного давления над периферией тектонических узлов; 2) частота выпадения жидких и твердых осадков выше на периферии, а количество на 26% больше; 3) изменение электрической проводимости воздуха, выражающееся в не прохождении сигналов сотовой связи, изменении характера короткопериодных магнитных вариаций, искажении («отскок») сигналов GPS; 4) кратное увеличение количества гроз.

На уровне растительного покрова зафиксированы: изменение структуры растительного покрова, коррелирующее с количеством тектонических пересечений, слагающих узел [Гофаров и др., 2006]; большее разнообразие растительности в узле; повышенное количество пораженных корневой губкой деревьев [Кутинов и др., 2020а]; отличие биохимических показателей лишайников на территории тектонического узла и за его пределами [Belyaev et al., 2019]; изменение урожайности черники и брусники и содержания химических элементов в плодах и почвах от центра узла к его периферии [Старицын, Полякова, 2022]; отличие во внутренней структуре древесины в центре и на периферии узлов [Neverov et al., 2019] .

Наблюдаемые эффекты в атмосфере вполне объяснимы глубинной дегазацией и наведенными магнитотеллурическими токами, характерными для тектонических узлов, о чем авторы уже писали раньше [Кутинов, Чистова, 2012]. Генерация электрических и магнитных сигналов в земной коре связана, в первую очередь, с нестационарными механическими нарушениями, вызывающими разделение электрических зарядов и нарушение установившихся токовых систем в тектонических нарушениях (нарушениях сплошности среды). Механизмы преобразования механической энергии в энергию электромагнитного поля в результате изменения напряженно-деформированного состояния горных пород, приводящего к изменению электрической проводимости, подробно рассмотрены в работе Т. В. Лосевой и др. [Лосева и др., 2009].

С выявленными изменениями в растительном покрове ситуации несколько сложнее. Считается, что на состояние растительного покрова основное влияние оказывает географическое положение, состав почвы, теплообеспеченность склонов (экспозиция и фотосинтетически активная радиация), осадки и стрессы. В целом, все вышеперечисленные условия на региональном уровне характерны для всей территории Архангельской области [Старицын, Полякова, 2022].

Для анализа вышеперечисленных условий на более локальном уровне нами были проанализированы вышеперечисленные параметры: экспозиция, углы склонов и кривизны их поверхностей и фотосинтетически активная радиация (ФАР). Для учёта влагонасыщенности территорий узлов были рассчитаны индекс расчлененности рельефа, топографический индекс влажности, площадь водосборных бассейнов, облачность (рис. 6Б), разностные поверхности (рис. 6А). Анализ был дополнен значениями LS-фактора (индекс потенциала плоскостной эрозии), индекса мощности эрозии и эндогенными факторами, показанными на рис. 4. Кроме того анализировались: пространственное положение узлов относительно климатических подзон; их площадь и форма; количество разломов, слагающих узел; наследование структур кристаллического фундамента в современном рельефе и группы, к которым относится конкретный узел по распределению высотных отметок рельефа (рис. 5В); состав осадочных пород, наличие карстующихся пород и геохимия почв.

В целом, все узлы, на которых были проведены мониторинговые исследования, отличаются друг от друга почти по всем проанализированным параметрам. Но есть и исключение, это значения коэффициента дискретности, удельной энергоемкости, отражающие глубинные процессы в

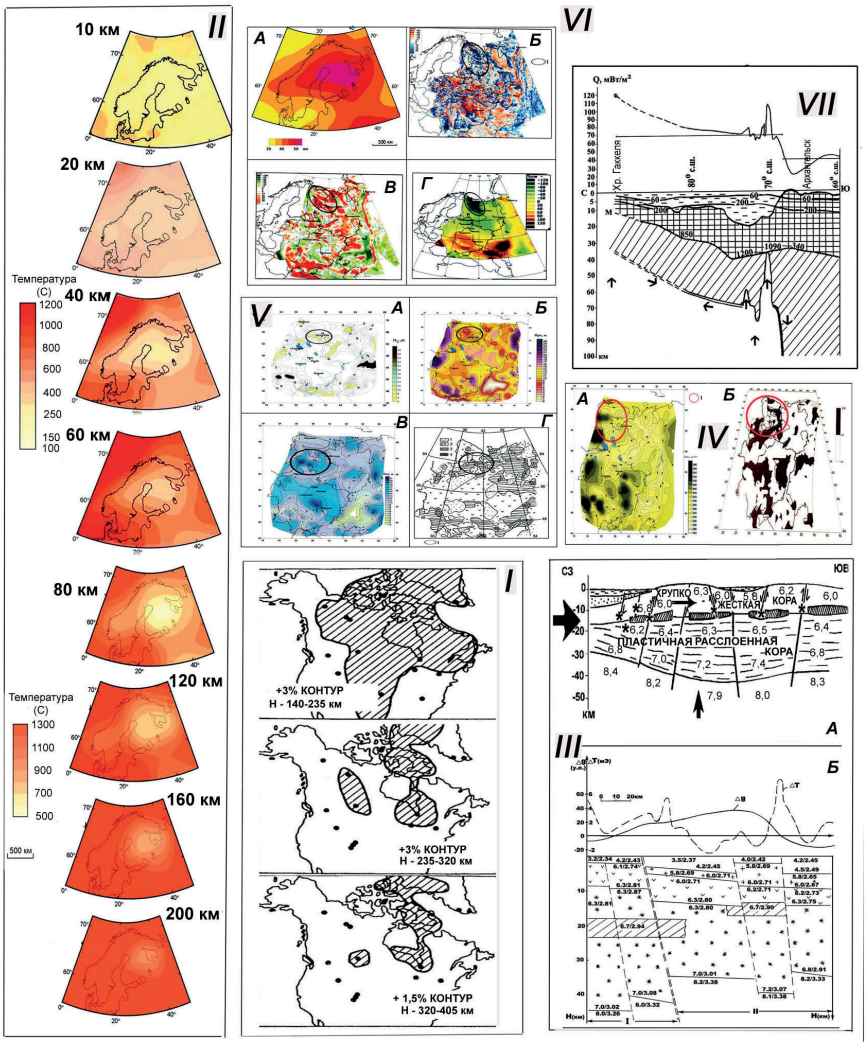

Рис. 8. Модель тектонического узла на уровне «мантия-литосфера» [Кутинов и др., 2019б]: I – возмущенные скорости поперечных сейсмических волн согласно томографической инверсии сейсмических волн (провинция Саскачеван, Канада) [Лехи, Тэйлор, 1997]; II – термическая модель литосферы региона на разных глубинах [Глазнев, 2003]; III – строение земной коры Балтийского щита и прилегающих территорий [Кутинов, Чистова, 2016]: А – модель современной динамики земной коры Балтийского щита, Б – фрагмент разреза по профилю ГСЗ № 3; IV – отражение тектонического узла в структуре поверхности Мохо [по: Юдахин и др., 2003]: А – карта глубины залегания поверхности Мохоровичича Восточно-Европейской платформы (ВЕП), Б – карта «резкости» границы Мохоровичича ВЕП. Выделены области (со значения К более 0.9) с активизированными свойствами границы Мохоровичича: 1 – «след» тектонического узла; V – отражение тектонического узла в строении земной коры [по: Юдахин и др., 2003]: А – карта мощности нижнего слоя земной коры ВЕП, Б – карта мощности среднего слоя, В – карта мощности нижнего слоя, Г – скорость Р-волн на поверхности Мохоровичича: 1 – «след» тектонического узла; VI – отражение тектонического узла в характере потенциальных полей: А – глубина изотермы Кюри [Глазнев, 2003], Б – карта аномального магнитного поля, [нТ] [по: Юдахин и др., 2003], В – карта аномалий силы тяжести в редукции Буге, [мгал] [по: Юдахин и др., 2003], Г – глубинные аномалии силы тяжести ВЕП [по: Юдахин и др., 2003]: 1 – «след» тектонического узла; VII – геолого-геофизический разрез литосферы по 400 в.д. (хр. Гаккеля – Архангельск) [Шварцман, 2001]

тектонических узлах. В то же время наблюдаемые явления изменения растительного покрова имеют идентичные закономерности, что говорит о доминирующем вкладе самих тектонических узлов, т.к. в противном случае эти изменения имели бы разный характер при разных параметрах.

При этом возникает вопрос, а какова глубинность узла, как единой вертикальной структуры, а не отдельных слагающих его тектонических нарушений. Для ответа на этот вопрос нами была создана модель тектонического узла 1-го порядка на уровне мантия-литосфера, которая приведена на рис. 8. Кроме данных по региону исследований, привлекались также данные сейсмотомографии по территории Канадской алмазоносной провинции для уточнения глубинного строения узлов. Так как

Канадская и Архангельская алмазоносные провинции входили в единую мегапровинцию [Милашев, 1990], что подтверждается результатами плитотектонической реконструкции Арктического региона [Зоненшайн и др., 1990], то использование данных по сейсмотомографии Канадской провинции для исследуемого региона корректно.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что глубинность тектонических узлов имеет 400 и более километров (рис. 8, I). В геолого-геофизических материалах узлы отражаются: в пониженных значениях температуры литосферы и астеносферы, с глубины, как минимум, 200 км и практически до дневной поверхности (рис. 8, II); в значениях теплового потока; в структуре потенциальных полей (рис. 8, VI); в строении поверхности Мохо (рис. 8, III) и кристаллического фундамента; в мощности слоев земной коры (рис. 8, V); в современном геодинамическом режиме, в макросейсмическом поле, дегазации и ионизации атмосферы. Строение тектонических узлов имеет фрактально-подобную структуру, схожую со структурой адвективных поднятий и диапиров мантийных астенолитов [Кутинов, 2021]. На площади тектонических узлов наблюдается корреспондирование структуры глубинных слоёв земной коры в фундаменте, осадочном чехле и современном рельефе, а также в структуре и свойствах растительного покрова.

На уровне фундамент – осадочный чехол – современный рельеф тектонические узлы выделяются как сквозные структуры, но с угасанием амплитуды подвижек по слагающим их разломам вверх по разрезу (от первых километров до первых метров). На уровне фундамента узлы характеризуются высокой блоковой делимостью и аномальными значениями теплового поля. В осадочном чехле по ним наблюдается подъём глубинных минерализованных вод, обогащенных глубинными газами.

Выводы

Узлы тектонических нарушений, имея сложную структуру проводимости, являются источниками наведенных вихревых токов, изменяющих общую картину геомагнитного поля, что подтверждается повышенными значениями электромагнитной эмиссии и частотой грозовых разрядов. В верхней части разреза наблюдаются палеодолины сложного строения с глубиной вреза до 200 метров [Кутинов, Чистова, 2004], являющиеся «гидрогеологическими окнами».

В результате мониторинговых измерений атмосферного давления над тектоническими узлами установлен факт постоянного «дефицита» атмосферного давления. Наблюдаются повышенные значения в центре и пониженные на периферии, что обеспечивает повышенную плотность облаков над периферией узлов и, как следствие, ускоренное выпадение атмосферных осадков: жидкие осадки на периферии выпадают чаще, а их количество на 26–38% больше, чем в центре тектонических узлов. Такая же картина наблюдается и в динамике снежного покрова. Анализ отклика литосферы на геомагнитные возмущения показал наличие связи между деформационными полями в тектонических узлах и компонентами геомагнитных вариаций. Причем, электромагнитная эмиссия достигает высоты более 600 км [Кутинов, Чистова, 2012]. Этот вывод подтверждается данными спутниковых измерений над глубинными разломами в литосфере [Ларкина и др., 1988].

Эти процессы, как в литосфере, так и в структуре рельефа, биосфере и атмосфере объясняются современными геодинамическими процессами, глубинной дегазацией и возникновением наведенных магнитотеллурических токов в земной коре. В результате многолетних мониторинговых исследований доказано, что тектонические узлы являются каналами межгеосферного взаимодействия не только литосферы и атмосферы, но и биосферы, причём на всех уровнях, влияя на растительный покров, как на макроуровне, так и на микроуровне.

Финансирование

Исследования проведены в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (проект № 122011300380-5).

Список литературы

Билибина Т.В. Блоковая тектоника и геодинамика земной коры северо-запада Русской платформы и принципы прогнозирования рудоносных структур // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности Русской платформы. Л. : ВСЕГЕИ, 1986. С. 22–29.

Бронгулев В.Вад., Жидков М.П., Макаренко А.Г. Современные геоморфологические режимы Русской и Западно-Сибирской равнин: сходство и различие // ДАН. Т. 399. 2004. № 4. С. 540–544.

Глазнев В.Н. Комплексные геофизические модели литосферы Фенноскандии. Апатиты: КАЭМ. 2003. 244 с.

Гофаров М.Ю., Болотов И.Н., Кутинов Ю.Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: Тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. Екатеринбург: УрО РАН. 2006. 158 с.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 2. М. : Недра. 1990. 334 с.

Кисин А.Ю., Коротеев В.А. Блоковая складчатость: экспериментальные исследования и практическое значение // Литосфера. 2016. № 5. С. 109–119.

Кутинов Ю.Г., Беленович Т.Я., Чистова З.Б. Дискретность земной коры, энергоемкость блоков и сейсмичность Европейского Севера России // Вестник геонаук. 2021. 11(323). С. 16–24. DOI: 10.19110/geov.2021.11.2.

Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Полякова Е.В., Чистова З.Б. Выбор базовой цифровой модели рельефа (ЦМР) равнинных территорий Севера Евразии и её подготовка для геологического районирования (на примере Архангельской области). Пенза: «Социосфера». 2019а. 176 с.

Кутинов Ю.Г. Современный геодинамический режим Арктического сегмента земной коры и нефтегазообразование. Пенза: Научн.-изд. центр «Социосфера». 2021. 281 с.

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Архангельская алмазоносная провинция на мелкомасштабных геологических, тектонических и геофизических картах // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. Т. 11. 2016. Вып. 1: Система планета Земля. http://www.j-spacetime.com/actual%20content/t11v1/2227-9490e-aprovr_e-ast11-1. 2016.12.php (дата обращения 15.09. 2022).

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Неверов Н.А. Покомпонентные модели тектонических узлов. 2018. https://regnum.ru/news/innovatio/2428428.html?t= 1528450221 (Дата обращения 15.09.2022).

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.

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Комплексная модель процессов межгеосферного взаимодействия в тектонических узлах Севера Русской плиты // Альманах Пространство и Время. 2012. Т. 1. Вып. 1. [Электронное научное издание]. URL: https://www.elibrary.ru/download /elibrary_18155740_99936501.pdf (дата обращения 15.09.2022).

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Неверов Н.А. Новые данные о влиянии тектонических узлов на состояние окружающей среды на севере Русской плиты // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020а. № 5. С. 12–24.

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В., Минеев А.Л. Применение цифровых моделей рельефа (ЦМР) для выделения тектонических структур древних платформ (на примере северо-запада Русской плиты). Пенза: «Социосфера». 2020б. 378 с.

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. 2019б. 1(24).

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Современный геодинамический режим севера Русской плиты // Уральский геологический журнал. 2020. 2(134), С. 26–39.

Кутинов Ю.Г. Экогеодинамика Арктического сегмента земной коры. Екатеринбург: УрО РАН . 2005. 388 с.

Ларкина В.И., Мигулин В.В., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В. Электромагнитное излучение над глубинными разломами литосферы по измерениям на спутнике // ДАН, 1998. Т. 300. № 6. С. 814–818.

Леонов Ю.Г. Тектоническая расслоенность коры платформ: факты и соображения // Вестник ОГГГИ РАН, 1997. № 1. С. 131–152.

Лехи К., Тэйлор Р. Влияние глубинной структуры региона Глени на алмазы в кимберлитах Саскачевана // Геол. и геофиз. 1997. Т. 38. № 2. С. 451–460.

Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю., Спивак А.А. Модель генерации электрических и магнитных импульсов при стесненном повороте блоков земной коры // Проблемы взаимодействия геосфер: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2009. С. 250–259.

Милашев В.А. Кимберлиты и глубинная геология. Л. : Недра. 1990. 167 с.

Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // Пространство и Время. 2017. №№ 2–4, 28–30. С. 267–288.

Минеев А.Л., Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Надёжность цифровой модели рельефа Архангельской области для проведения геоэкологических исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 58–67. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-58-67.

Погода и климат / [Пер. с англ. В. Быстрова]. М. : ТЕРРА – Кн. клуб, 1998. 151 с.

Полякова Е.В., Кутинов Ю.Г., Минеев А.Л., Чистова З.Б. Опыт применения цифрового моделирования для выявления наследования структур фундамента в современном рельефе севера Русской плиты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 75–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-75-83.

Савицкий А.В., Афанасьева Е.Н., Гукасян Г.О. и др. Разрывные нарушения северо-запада Русской платформы и их металлогеническое значение // Блоковая тектоника и перспективы рудоносности северо-запада Русской платформы. Л. : ВСЕГЕИ, 1986. С. 39–52.

Составление карт глубинного строения и прогноза кимберлитового магматизма севера Восточно-Европейской платформы м-ба 1:1 000 000. / Березовский В.З., Широбоков В.Н., Губайдулина Л.В. и др. – Отчет по теме А.III.I/601(5). АПГО, Архангельск, 1988. 146 с.

Старицын, В.В., Полякова Е.В. Содержание аскорбиновой кислоты в плодах черники (Vaccinium myrtillus) в пределах Холмогорского тектонического узла Архангельской области // Успехи современного естествознания. 2022. № 6. С. 77–82. DOI 10.17513/use.37844.

Чернова И.Ю., Нугманов И.И., Даутов А.Н. Применение аналитических функций ГИС для усовершенствования и развития структурно-морфологических методов изучения неотектоники // Геоинформатика. 2010. №. 4. С. 9–22.

Шварцман Ю.Г. Тепловое состояние литосферы и новейшие измерения климата на Европейском Севере. Литосфера и гидросфера европейского Севера России / Под ред. Ф.Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 130–154.

Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахова Е.В. Исследования активности платформенных территорий с использованием микросейсм. Екатеринбург: УрО РАН. 2008. 128 с.

Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И. Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: изд-во УрО РАН. 2003. 299 с

Belyaev V.V., Bogolytsyn K.G., Brovko O.S., Kutinov Yu.G., Neverov N.A., Palamarchuk I.A., Boytsova T.A., Chukhchin D.G., Zhiltsova D.V., Gorshkova N.A., 2019. Influence of tectonic knot on the conditions and properties of some biogeocenosis components in the subarctic area // European Journal of Environmental Sciences 9(1). DOI: 10.14712/23361964.2019.1.

Neverov N.A., Belyaev V.V., Chistova Z.B., Kutinov Y.G., Staritsyn V.V., Polyakova E.V., Mineev A.L., Tyukavina O.N., 2019/ Influence of morphometric parameters of relief on macro- and microstructure of wood Pinus silvestris L. in the North of the Russian plain // J. For. Sci. 65, 79–85. DOI: 10.17221/123/2018-JFS.

RESULTS OF MONITORING STUDIES OF THE PROCESSES OF INTERGEOSPHERIC INTERACTION IN THE TECTONIC NODES OF THE NORTH OF THE RUSSIAN PLATE

Y. G. Kutinov[1]*, Z. B. Chistova[1], A. L. Mineev[1], E. V. Polyakova[1], N. A. Neveorov[1]

[1]N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

**E-mail: kutinov@fciarctic.ru*

To summarize the data of long-term monitoring observations, the authors created models of intergeospheric interaction at the level: mantle-lithosphere; basement-sedimentary cover-modern relief; lithosphere-atmosphere and, partially, ionosphere. In general, the authors conducted studies of 18 first-order tectonic nodes on the area of the Arkhangelsk region. The research included: - analysis of geological and geophysical materials, - digital modeling of the relief of the roof of the basement and the surface of the modern relief, - monitoring observations of the quantitative characteristics of abiogenic (electromagnetic emission, atmospheric pressure, inflow of deep gases, the rate of precipitation of solid and liquid precipitation, etc.) and biogenic processes (structure and composition of vegetation cover, the content of chemical elements in soils and vegetation cover) in tectonic nodes. Seismotomography data from the Canadian Diamond Province were also used to clarify the deep structure of the nodes. Analysis of the results obtained allows us to assert that the depth of tectonic nodes have 400 km or more. They are reflected in reduced temperature values in the lithosphere, from a depth of at least 200 km and asthenosphere and almost to the surface of relief; in terms of heat flux; in the structure of potential fields; in the structure of the Moho surface and the crystalline basement; in the power of the layers of the earth›s crust; in the modern geodynamic mode, in the macroseismic field, degassing and ionization of the atmosphere (up to the ionosphere). The structure of tectonic nodes has a fractal-like (tree-like) structure, similar to the structure of advective uplifts and diapirs of mantle asthenoliths. In the area of tectonic nodes, there is a correspondence of the structure of the deep layers of the earth›s crust in the basement, sedimentary cover and modern relief, as well as in the structure and properties of the vegetation cover. These processes are explained by geodynamic processes, deep degassing and the occurrence of induced magneto-telluric currents in the earth›s crust. Intergeospheric interaction in the areas of tectonic nodes is reflected in the structure of the atmosphere and, partially, the ionosphere. As a result of measurements of atmospheric pressure over tectonic nodes, the fact of a constant «deficit» of atmospheric pressure was established. We recorded an increased density of thunderstorms in the areas of tectonic nodes, as well as distortion of GPS signals. This scientific direction has a prognostic value in geoecological research. The results obtained are important to take into account when developing and analyzing geoecological studies of various scales and monitoring modern geoecological risks.

Keywords: North of the Russian plate, tectonic nodes, intergeospheric interaction, lithosphere, biosphere, atmosphere.