

ГРАВИСТРУКТУРНЫЕ КАРТЫ КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА ПЛАСТОВО-БЛОКОВОГО СТРОЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

С. М. Макеев, А. Е. Ануфриев

На основании того, что в геологических условиях Сибирской платформы благоприятные ловушки углеводородов связаны с глубокозалегающими отложениями верхнего протерозоя, сделано предположение, что коллекторские свойства горных пород на больших глубинах и на протяжении длительного геологического времени могут сохраняться, только если эти породы обладают положительной избыточной плотностью по отношению к вмещающей среде. Далее, отталкиваясь от хорошо известной корреляции между скоростью сейсмических волн и плотностью горных пород, авторы утверждают, что благоприятные для накопления углеводородов антиклинальные поднятия, в кровле которых находятся относительно плотные породы, должны, помимо сейсмоструктурных аномалий, сопровождаться и положительным гравитационным эффектом. Для проверки этого утверждения проведено сопоставление геологической информативности сейсмоструктурной и гравиструктурной карт двух сопряженных участков, перспективных на газ. Показано, что гравиструктурная карта, построенная с помощью оригинального метода частотно-азимутального анализа, отражает не только сами сейсмоструктурные поднятия, но и «вмещающие» их протяженные зоны, вероятно, сейсмоструктурного уплотнения горных пород. Сделан вывод о перспективности таких зон на обнаружение коллекторов трещинного типа и необходимости комплексирования сейсморазведки и несейсмических методов для повышения эффективности поисков углеводородов в сложных условиях пластово-блокового строения Сибирской платформы.

Ключевые слова: гравиструктурная карта, частотно-азимутальный анализ, сейсмоструктурное уплотнение, коллекторы трещинного типа, пластово-блоковое строение, оценка нефтегазоносности.

GRAVITY-STRUCTURAL MAPS AS NEW TOOL TO ANALYSE THE SIBERIAN PLATFORM BEDDED-BLOCK STRUCTURE

S. M. Makeev, A. E. Anufriev

Relying on the fact that many traps are connected with deep Upper-Proterozoic deposits of the Siberian Platform, the assumption that reservoir properties of rocks at low depths and throughout a long geologic time can remain only if these rocks possess positive excess density in relation to their host medium is made. Furthermore, making a start from a well-known correlation between seismic wave velocities and rock densities, the paper states that favorable for hydrocarbon accumulations anticlinal domes, with rather dense rocks as their roofs, have to be followed by a positive gravitational effect besides seismic-structural anomalies. For verification of this statement, geological information contents of seismic-structural and gravity-structural maps of two joined areas promising for gas have been compared. It is shown that the gravity-structural map constructed by means of an original method of frequency-azimuth analysis reflects not only seismic-structural domes themselves, but also extended zones, "containing" these domes, probably of seismic-tectonic compaction of rocks. The conclusion regarding prospects of such zones on detecting fractured-type reservoirs and the need for integrating seismic exploration and non seismic methods to improve efficiency of prospecting for hydrocarbons in difficult conditions of the Siberian Platform bedded-block structure is drawn.

Keywords: gravity-structural map, frequency-azimuth analysis, seismic-tectonic compaction, fractured-type reservoirs, bedded-block structure, estimation of oil-and-gas content.

Пластово-блоковое строение Сибирской платформы и широкое развитие траппового магматизма существенно усложняют поиски углеводородов (УВ) с помощью сейсморазведки. Переход на 3D-технологии лишь отчасти и лишь на локальных площадях снимает эти проблемы, в то же время в разы увеличивая стоимость работ. Участие в Первой научно-практической конференции «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири» (Новосибирск, СНИИГиМС, 29–31 января 2014 г.) привело авторов к мысли, что еще не вполне сложился комплекс методов, достаточный для эффективных поисков УВ в сложных геолого-геофизических условиях Сибирской платформы. И хотя очевидно, что при геологическом изучении осадочного чехла ведущую роль играет сейсморазведка, на этапах

предварительного анализа поисковых площадей, корректирования поисков и особенно при проектировании поисковых скважин целесообразно комплексировать сейсморазведку с другими методами оценки нефтегазоносности.

В этом контексте недооцененным, на взгляд авторов, методом изучения нефтегазоносных территорий является гравиразведка, опирающаяся на плотность горных пород. Благоприятные ловушки УВ в геологических условиях Сибирской платформы обычно связаны с глубокозалегающими (2–3 км) отложениями верхнего протерозоя [2], в которых ожидается широкое развитие коллекторов трещинного типа [1]. Однако фильтрационно-емкостные свойства горных пород на больших глубинах и на протяжении длительного геологического времени могут сохра-



Средние оценки физических свойств горных пород Байкитской антеклизы

Комплекс	Возраст	Свита	Сейсмические границы	Литологический состав	Средняя плотность, г/см ³	Средняя скорость V _p , м/с			
Пятый (надсолевой)	Q			Рыхлые породы	2,0	2000			
	P			Трапповый комплекс	2,9	7000			
	T			Терригенные породы	2,4	4200			
	C			Карбонатные породы	2,6	5000			
	S								
	O								
	Є ₃	Эвенкийская		Переслаивание алевролитов, мергелей с прослоями доломитов, известняков	2,5	4600			
	Є ₂			Линзы каменной соли					
Четвертый (соленосный)	Є ₁	Оленчиминская (литвинцевская)	H ₁	Галогенно-карбонатный (соленосный)	2,2 – соли; 2,75 – доломиты	4000 – соли; 6800 – доломиты			
		Ангарская	H ₂						
		Булайская	K ₁						
		Бельская	K ₂						
		Усольская	У ₀						
			A, У ₁						
Третий (подсолевой)	V	Тэтэрская		Терригенно-карбонатный подкомплекс	2,7	6200			
		Собинская							
		Катангская	M ₁						
		Оскобинская	R ₀				Терригенный подкомплекс	2,5	4600
		Ванаварская							
Второй	R		Φ (преломл.)	Терригенно-карбонатные отложения	2,7	6000			
				Карбонатные отложения	2,78	7000			
Первый	AR	V		Гранитоиды и гранитогнейсы кристаллического фундамента	2,8	7100			

няться, только если эти породы обладают высокой механической прочностью, которая, в свою очередь, определяется их положительной избыточной плотностью по отношению к вмещающей среде. В этом случае благоприятные для накопления УВ антиклинальные поднятия, в кровле которых находятся относительно плотные породы с коллекторами трещинного типа, должны сопровождаться положительными гравитационными аномалиями.

В таблице, составленной на основе обобщения работ ОАО «Енисейгеофизика»¹, приведены физические свойства горных пород обрамления Байкитской антеклизы. Положительная корреляция скорости продольных волн и плотности горных пород по разные стороны от региональной отражающей границы «Б»² позволяет предположить, что сейсмоструктурные поднятия этой границы и гравитационные аномалии от них должны пространственно совпадать. Иными словами, данные сейсмо- и гравиразведки должны информативно дополнять друг друга, так как

оба метода, по сути, опираются на одно физическое свойство горных пород – акустический импеданс, определяемый как произведение скорости продольных волн на плотность. В настоящей статье сделана попытка проверить практическую значимость этой хорошо известной корреляции.

Постановка задачи

Одной из важных характеристик положительных сейсмоструктурных аномалий (поднятий, мысов и выступов) является азимут их простирания. Наиболее точные сейсмоструктурные карты, отражающие пространственную ориентацию таких аномалий, строятся на основе 3D-технологий сейсморазведки. Однако, учитывая их высокую стоимость, целесообразно изучить возможности выявления положительных гравитационных аномалий, корреляционно связанных с аномалиями сейсмоструктурной природы. Положительный итог такого изучения мог бы существенно расширить информативность геофизических методов при решении задач, связанных с прогнозированием сейсмоструктурных поднятий за пределами участков, достоверно изученных сейсморазведкой, и с анализом блокового строения таких участков.

Предположив, что положительные сейсмоструктурные аномалии, регистрируемые по отраже-

¹ Авторы выражают признательность В. Ф. Бобылеву (ЦГИ «Прогноз», Красноярск) за помощь в составлении данной таблицы.

² Региональная сейсмическая граница «Б» разделяет доломиты тэтэрской свиты (скорость 6200 м/с, плотность 2,75 г/см³) и соленосные отложения усольской свиты (скорость 4000 м/с, плотность 2,2 г/см³).



ниям от региональной сейсмической границы «Б», должны отражаться и на карте гравитационного поля, мы решили сопоставить сейсмо- и гравиструктурные карты двух лицензионных участков (ЛУ), перспективных на газ: Абаканского и Имбинского. Географически оба участка находятся в юго-западной части Сибирской платформы в районе пос. Богучаны (Красноярский край) на р. Ангара. Тектоническое положение ЛУ – зона Ангарских складок на сочленении южного склона Байкитской антеклизы и Присаяно-Енисейской синеклизы. В пределах участков выявлены два брахиантиклинальных поднятия (Абаканское и Имбинское), с юга ограниченные крупным региональным сбросом с амплитудой (по данным сейсморазведки) до 900 м. Другой характерной особенностью геологического строения ЛУ является насыщенность разреза долерито-базальтами, выходящими на дневную поверхность в виде пологозалегающих интрузивных тел с углами падения 2–15° на юго-юго-восток.

Фактической основой для сопоставления послужили сейсмоструктурная карта горизонта «Б», построенная по данным 2D-съемки в 2011 г. и предоставленная геологической службой ООО «Газпром Геологоразведка» (Красноярск), и карта аномального гравитационного поля м-ба 1:200 000, полученная из базы данных «Гравимаг» (ФГУ НПП «Геологоразведка», Санкт-Петербург) в виде матрицы значений аномалий в редукции Буге 1000×1000 м. Выходы долерито-базальтов скопированы с листа О-47-XIV Государственной геологической карты м-ба 1:200 000.

В работе были применены два взаимодополняющих подхода к интерпретации гравиметрических данных: морфологический анализ поля и математическое моделирование аномалеобразующих объектов.

Морфологический анализ гравитационного поля

Допуская, что аномальный гравитационный эффект от небольших азимутально-ориентированных брахиантиклинальных поднятий доломитов тэтэрской свиты (с избыточной плотностью до 0,3 г/см³), залегающих на высокоградиентном склоне гравитационного максимума Байкитской антеклизы на глубинах около 2,0 км, не может быть большим, мы встали перед необходимостью разработки высокочувствительного метода *азимутального* анализа гравитационного поля.

Как известно, азимут простирания является главным атрибутом пространственно-ориентированных объектов и в своей графической трактовке представляет луч, т.е. это объект *одномерный*. Поэтому при обработке матрицы исходных данных мы намеренно отказались от использования любых двумерных элементов анализа (пикселей, кругов, эллипсов и т.п.), а также операций интегрирования внутри таких элементов. Связано это с тем, что интегриро-

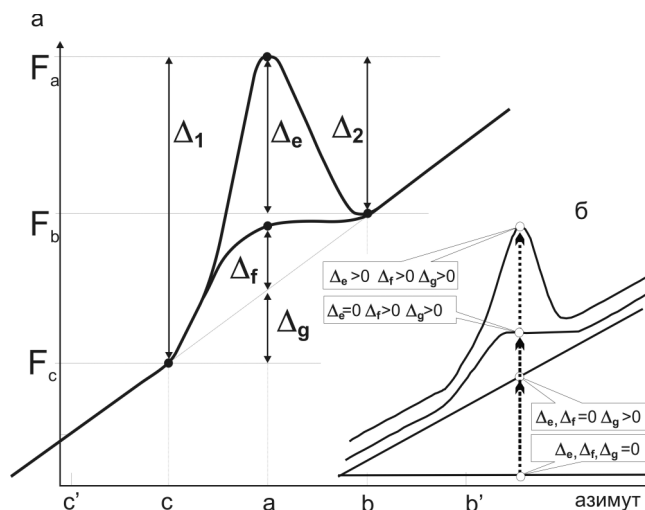


Рис. 1. Математическая модель поля (а) и последовательность усложнения его морфологии (б) (обозначения см. в тексте)

вание внутри двумерных элементов с априорно неизвестными весовыми функциями вдоль разных азимутов неизбежно приводит к смешению информации в центральной точке таких элементов, а значит, к искажению азимутальной дисперсии изучаемого поля. Поэтому нами применялись только дифференциальные процедуры математической обработки данных вдоль одномерных пространственных элементов – азимутально-ориентированных отрезков.

В качестве пространственного элемента анализа гравитационного поля на квадратной сетке был выбран азимутально-ориентированный отрезок $[c, a, b]$, проходящий через три точки (рис. 1, а). В центральной точке a введена морфологическая модель, состоящая из трех возможных типов особенностей поля. Особенности экстремального Δ_e -типа характеризуют аномалии, выраженные явным образом в виде экстремумов положительного или отрицательного знака; флексурного Δ_f -типа – аномалии, выраженные неявным образом в виде «флексур» положительного знака. Аномалии этого типа встречаются более часто и, по сути, аналогичны аномалиям первого типа на линейно-меняющемся фоне, интенсивность изменения которого можно оценить с помощью особенностей градиентного Δ_g -типа. Универсальная для полей любой природы последовательность усложнения морфологической структуры их аномалий показана на рис. 1, б.

Формулы, с помощью которых можно рассчитать морфологические особенности поля указанных типов, представляют собой математические операции над двумя конечными разностями – «встречными дифференциалами» Δ_1 и Δ_2 . Например, при выделении особенностей Δ_e -, Δ_f и Δ_g -типов в окрестности $[b, c]$ точки a (рис. 1, а), алгоритм расчета следующий:

1) $\Delta_1 = F_a - F_c$; $\Delta_2 = F_a - F_b$, где F_a , F_b и F_c – значения измеренного поля;

2) если $\Delta_1 \Delta_2 > 0$ и $\Delta_1 > 0$, то $\Delta_e^+ = \min(\Delta_1, \Delta_2)$ – положительные аномалии Δ_e -типа;



3) если $\Delta_1 \Delta_2 > 0$ и $\Delta_1 < 0$, то $\Delta_e^- = \max(\Delta_1; \Delta_2)$ – отрицательные аномалии Δ_e^- -типа;

4) если $\Delta_1 \Delta_2 < 0$, то $\Delta_f^\pm = (\Delta_1 + \Delta_2)/2$ (интерпретируются только положительные аномалии Δ_f^\pm -типа);

5) $\Delta_g = |\Delta_1 + \Delta_2|/2n$.

В этих формулах явно или неявно используется натуральное число n , характеризующее порядок окружения центральной точки a . Так, b и c на рис. 1, а образуют первый порядок окружения точки a , точки b' и c' – второй и т.д. Введение порядка окружения позволяет в ходе последовательной процедуры разложения выделять особенности Δ_e^- , Δ_f^\pm и Δ_g -типов разной пространственной частоты, т.е. проводить частотный анализ поля в пространственной области. При этом выделяемые аномалии характеризуют изменчивость поля в направлении азимутально-ориентированных отрезков $[c, a, b]$, $[c', a, b']$ и т.д., азимуты которых однозначно определены типом регулярной сетки точек a, b, c, b', c' и т.д. Для квадратной сетки число доступных азимутов анализа увеличивается всякий раз на четыре при переходе к следующему порядку окружения центральной точки.

Как результат, полученный на основе «встречных дифференциалов», метод частотно-азимутального анализа позволяет осуществить разложение гравитационного поля во всем диапазоне доступных азимутов и пространственных частот, формируя множество отдельных слоев для трех типов морфологических особенностей (например, для $n = 1$ количество слоев информации равно 12). Обратный синтез слоев в той или иной комбинации позволяет ставить и решать разные геологические задачи, связанные прежде всего с изучением азимутально-ориентированных геологических объектов и процессов.

Так, в отношении гравитационного поля изученных ЛУ (рис. 2, а) были рассчитаны положительные аномалии Δ_e^- , Δ_f^\pm и Δ_g -типов для $n = 1$ (азимуты анализа $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$), $n = 2$ ($0^\circ, 27^\circ, 45^\circ, 63^\circ, 90^\circ, 117^\circ, 135^\circ, 153^\circ$) и $n = 3$ ($0^\circ, 18^\circ, 34^\circ, 45^\circ, 56^\circ, 72^\circ, 90^\circ, 108^\circ, 124^\circ, 135^\circ, 146^\circ, 162^\circ$). Далее, для $n = 1, n = 2$ и $n = 3$ в каждом узле сетки были рассчитаны суперпозиции $\sup \Delta_{n=1e^-}$, $\sup \Delta_{n=2e^-}$, $\sup \Delta_{n=3e^-}$, $\sup \Delta_{n=1f^\pm}$, $\sup \Delta_{n=2f^\pm}$, $\sup \Delta_{n=3f^\pm}$, $\sup \Delta_{n=1g}$, $\sup \Delta_{n=2g}$, $\sup \Delta_{n=3g}$, представляющие собой максимальные по модулю значения аномалий Δ_e^- , Δ_f^\pm или Δ_g -типов, перебираемые по всем доступным азимутам. Из полученных суперпозиций составлены три суммы

$$\left(\sum_{n=1}^3 \sup \Delta_{e_n^-}, \sum_{n=1}^3 \sup \Delta_{f_n^\pm} \text{ и } \sum_{n=1}^3 \sup \Delta_{g_n} \right), \text{ на основании}$$

которых в пределах изученной площади были построены две группы локальных положительных аномалий гравитационного поля: Δ_e^- -типа

$$\left(\sum_{n=1}^3 \sup \Delta_{e_n^-} \right) \text{ и } \Delta_f^\pm\text{-типа } \left(\sum_{n=1}^3 \sup \Delta_{f_n^\pm} \right) \text{ в диапазоне длин}$$

азимутально-ориентированных отрезков от 1 до

6 км¹. На рис. 2, б приведена результирующая *гравиструктурная карта* ЛУ, на которой непрерывными изолиниями показаны аномалии Δ_e^- -типа, пунктирными – аномалии Δ_f^\pm -типа². Аномалии Δ_g -типа

$$\left(\sum_{n=1}^3 \sup \Delta_{g_n} \right), \text{ отражающие зоны высокого градиента}$$

поля, заменены осевыми линиями этих аномалий. Для сопоставления на рис. 2, в показана сейсмоструктурная карта глубин горизонта «Б» с выделенными на ней осями сейсмоструктурных аномалий.

Математическое моделирование аномалеобразующих объектов

Выявленные на рис. 2, б положительные аномалии Δ_f^\pm -типа имеют столь малую амплитуду (около 1–2 мГал) и столь большую протяженность (около 30 км), что авторы не раз слышали возражения коллег относительно «математической природы» этих аномалий, не связанной с плотностными эффектами от горных пород. Само по себе это возражение справедливо. Однако следует обратить внимание на два обстоятельства.

Во-первых, само понятие «аномалия» принципиально неопределимо и допускает разные акценты. Авторы, например, полагают, что в него необходимо на равных основаниях включать оценку и амплитуды (мерой выступает случайная погрешность измерений), и протяженности аномалии. Мерой протяженности аномалий является количество пространственно скоррелированных точек с систематически отклоняющимися в одну сторону амплитудами, даже если последние сопоставимы со случайной погрешностью измерений.

Во-вторых, нам кажется не вполне корректным оценивать с помощью случайной погрешности величины *единичного* измерения поля³ величину рассматриваемых аномалий Δ_f^\pm -типа. Дело в том, что в процессе математического расчета величины Δ_f^\pm в каждом узле сетки алгоритм обработки учитывал данные больше чем от одного единичного измерения. Так, для расчета особенности Δ_f^\pm -типа для первого порядка окружения $n = 1$ использовалось $N = 9$ единичных измерений, для $n = 2$ – $N = 17$, для $n = 3$ – $N = 25$. Если накопленную в процессе супер-

¹ В методе частотно-азимутального анализа поля *длина* азимутально-ориентированного отрезка является базовым элементом обработки данных, одномерным аналогом *площади* двумерных элементов (кругов, эллипсов, пикселей), используемых в других методах пространственного анализа полей.

² Поскольку *отрицательные* значения гравитационных аномалий Δ_e^- и Δ_f^\pm -типов в рамках решаемой задачи не рассматривались, то на рис. 2 они не вынесены, и далее речь всегда идет о *положительных* аномалиях.

³ Случайная среднеквадратическая погрешность единичных измерений аномального поля в редукции Буге для государственных карт м-ба 1:200 000 обычно имеет порядок 0,5 мГал (данные В. А. Одегова и А. П. Четвергова, ЦГЭ).

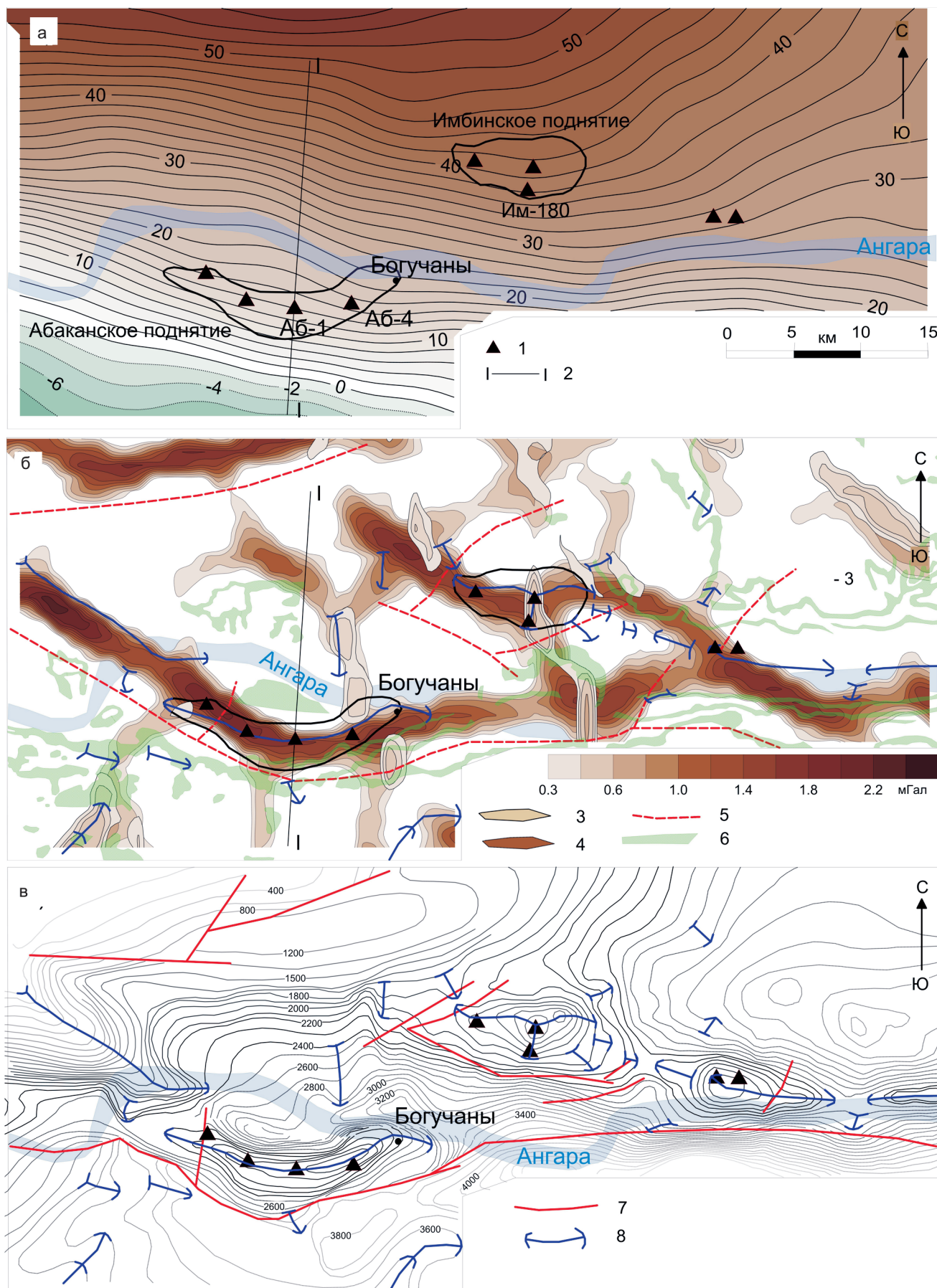


Рис. 2. Абаканский и Имбинский лицензионные участки: а – карта исходного гравитационного поля (мГал): 1 – поисковые скважины, 2 – линия профиля для математической модели; б – карта гравитационных аномалий: 3 – Δ_g -типа; 4 – Δ_g -типа; 5 – осевые линии аномалий Δ_g -типа; 6 – пластовые тела долеритов; в – сейсмоструктурная карта: 7 – тектонические нарушения по данным сейсморазведки; 8 – оси сейсмоструктурных аномалий



позиции абсолютную погрешность $\sigma_{\text{ср}}$ оценивать по известной формуле $\sigma_{\text{ср}} = \sigma / \sqrt{N}$ (где σ – случайная погрешность единичного измерения), то эта погрешность должна закономерно уменьшаться пропорционально \sqrt{N} .

Авторы понимают, что абстрактные рассуждения не снимают проблемы погрешности слабо-контрастных аномалий¹, поэтому было выполнено прямое математическое моделирование гравитационного эффекта от Абаканского поднятия и его геологического обрамления.

В качестве основного элемента модели для брахиантиклинальной складки (Абаканского структурного поднятия) был принят ограниченный по простиранию цилиндрический слой произвольной мощности и плотности, произвольно усеченный плоскостью, параллельной дневной поверхности. Были выбраны параметры для модели складки: по изолинии глубин 2530 м – длина складки 15 км и ширина 4 км; глубина до поверхности кровли 1830 м; мощность доломитов в замке 400 м; плотность 2,75 г/см³. В качестве дополнительного модельного элемента был принят прямой параллелепипед с изменяемым углом между двумя смежными плоскостями, произвольным углом наклона к дневной поверхности и произвольной глубиной залегания верхнего ребра параллелепипеда. Дополнительный элемент позволил смоделировать наклонный клиновидный блок кристаллического фундамента, имитирующий выступ Байкитской антеклизы, а также зону разуплотнения, имитирующую глубинный разлом. Формы и геометрия залегания основного и дополнительных элементов модели показаны на рис. 3.

Расчет гравитационного эффекта в произвольной точке плоской дневной поверхности (имитированной квадратом 160×160 км) от суперпозиции трех объемных модельных объектов (складки, блока фундамента и зоны разуплотнения) выполнен классическим методом интегрирования конечных элементов.

На рис. 3 представлен субмеридиональный разрез измеренного поля и его математической модели по линии I–I, проходящей через поисковую скв. Аб-1, данные по которой и были использованы для задания геометрических параметров Абаканского поднятия.

Результаты проведенного исследования можно свести к следующим.

1. Высокая степень пространственной корреляции положительных сейсмоструктурных и гравитационных аномалий на рис. 2, б позволяет предположить по меньшей мере *парагенетическую* связь объектов, образующих эти аномалии.

¹ Прямая проверка значимости выявленных аномалий Δ_f -типа возможна лишь в том случае, если исходные измерения выполнены непосредственно по квадратной сети точек наблюдений и аномалии Δ_f -типа выделены без предварительной регуляризации этой сети.

2. Пересечение субширотных и субмеридиональных гравитационных аномалий выявило блоковое строение ЛУ. Обращает на себя внимание относительно высокая пространственная корреляция гравитационных и сейсмоструктурных аномалий субширотного простирания, тогда как субмеридиональным аномалиям гравитационного поля соответствуют лишь несколько фрагментов субмеридиональных сейсмоструктурных аномалий (на рис. 2 к северу от скв. Аб-4 и к югу от скв. Им-180).

3. Отмечается отсутствие явно выраженной пространственной корреляции положительных аномалий гравитационного поля и выходов на дневную поверхность пластовых интрузий долерито-базальтов.

4. Характерная особенность гравитационных аномалий Δ_f -типа заключается в их большой протяженности, существенно превосходящей длину пространственно скоррелированных с ними сейсмоструктурных поднятий. Это хорошо видно на рис. 2 при сопоставлении длины Абаканского поднятия (15 км) и скоррелированной с ним субширотной гравитационной аномалии (30 км).

Обсуждение результатов

1. Высокая степень пространственной корреляции сейсмоструктурных поднятий и положительных гравитационных аномалий Δ_f -типа (см. рис. 2, б, в) дает основание полагать, что последние являются прямыми проекциями на дневную поверхность брахиантиклинальных складок, в замках которых находятся уплотненные породы, в частности доломиты тэтэрской свиты. Качественное сходство морфологии измеренного поля и поля математической модели вдоль линии I–I через Абаканское поднятие (см. рис. 3, б) не противоречит такому предположению и свидетельствует о возможности выделения математическими средствами на картах м-ба 1:200 000 слабых положительных гравитационных эффектов от антиклиналей даже на фоне высокоградиентных полей от выступов кристаллического фундамента.

2. Вероятная причина различной степени пространственной корреляции сейсмоструктурных и гравитационных аномалий субширотного и субмеридионального простирания заключается, на наш взгляд, в разной азимутальной представительности результатов 2D-сейсморазведки. Обычно сейсмоструктуры, залегающие вкрест направления профилей съемки, регистрируются более контрастно, чем структуры, простирание которых совпадает с направлением профилей. И поскольку при построении представленной на рис. 2, в сейсмоструктурной карты количество субмеридиональных профилей превосходило количество субширотных, то этим, вероятно, и можно объяснить недостаточную контрастность отражения на ней структур субмеридионального простирания.

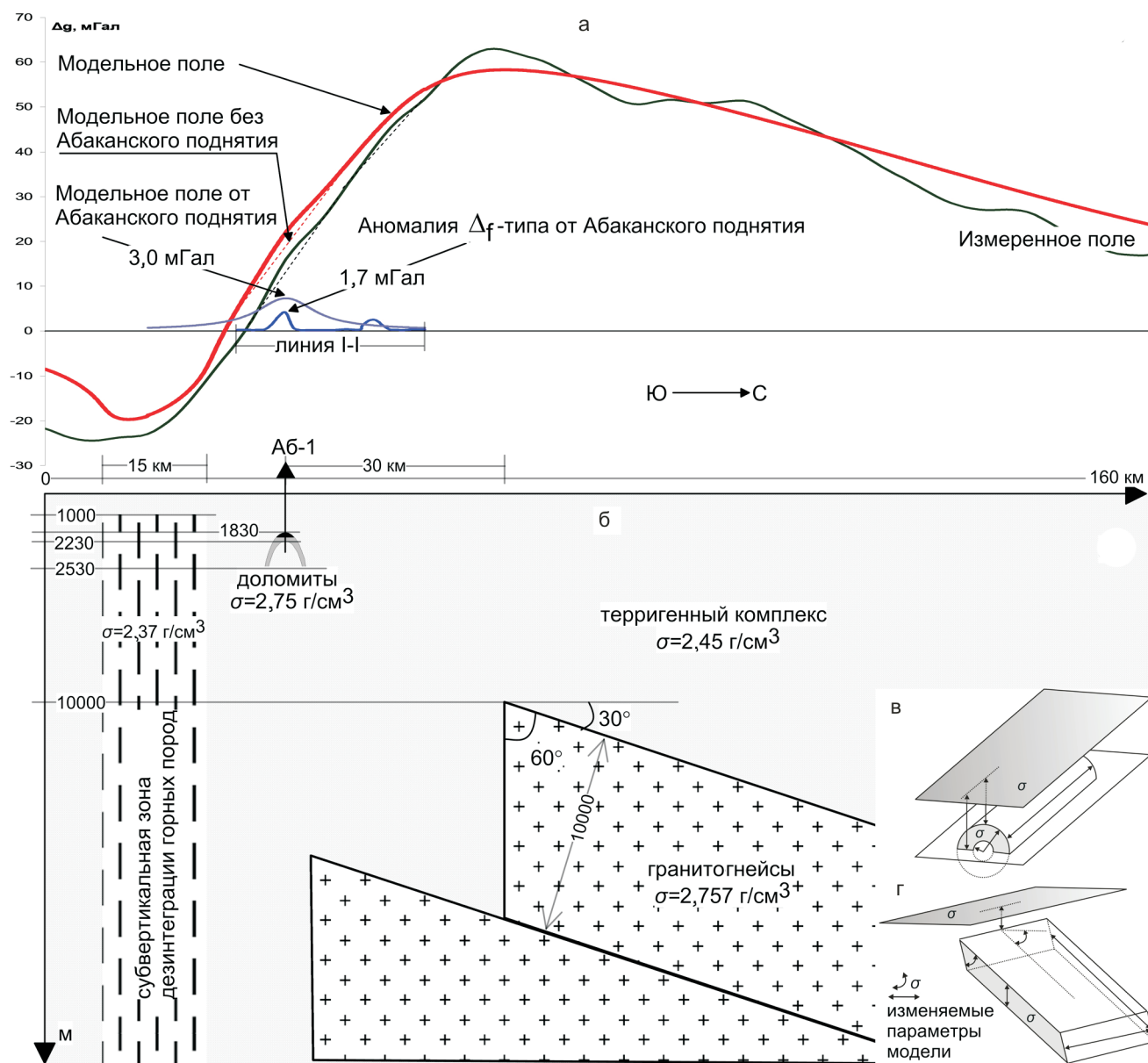


Рис. 3. Модель гравитационного поля от Абаканского поднятия: а – профили измеренного и модельных полей; б – модельный разрез вдоль линии I-I; в – модель антиклинального поднятия; г – модель клиновидного блока фундамента

3. Известно, что интрузии долерито-базальтов – потенциальная помеха как для сейсморазведки, так и для гравиразведки. Однако проявляется эта помеха по-разному. Если базальты залегают в виде пластовых тел с малым углом падения, то такие пласты существенно влияют на результаты сейсморазведки, создавая сильные отражения первичной волны в верхней части разреза и ослабляя сигналы полезных волн, отраженных от глубокозалегающих сейсмических границ. Влияние таких пластов на результаты гравиразведки менее заметно, поскольку протяженные субгоризонтальные пласты траппов создают лишь повышенный низкочастотный (практически постоянный) фон, а ориентированные антиклинальные поднятия – азимутально-направленные гравитационные аномалии в более высокочастотной части спектра и легко распознаются частотно-азимутальным анализом. Наиболее существенное влияние на данные гра-

виразведки должны оказывать долерито-базальты, залегающие в форме мощных крутопадающих даек, и особенно субвертикальные каналы внедрения базальтовой магмы. Очевидно, что эффективно решить задачу отделения аномалий от гравиструктурных антиклинальных поднятий и субвертикальных каналов внедрения траппов можно только при помощи совместного частотно-азимутального анализа данных гравиразведки и магниторазведки.

4. Объяснить большую протяженность гравитационных аномалий Δ_f -типа по сравнению с протяженностью сейсмоструктурных поднятий можно следующим образом.

Аномальный гравитационный эффект создается *всем объемом* горных пород вдоль всей зоны их уплотнения (в том числе и объемом плотных пород в кровле антиклинальных поднятий). Аномальное же отражение сейсмических волн есть *эффект поверхностный*, в максимальной степени



создаваемый лишь сейсмически гладкими поверхностями. В местах «тектонического гофрирования» таких поверхностей, где увеличивается вероятность дифракции, интенсивность полезных отраженных волн снижается. Следствием разной амалеобразующей представительности одних и тех же объемов горного пространства может быть и разная протяженность аномалий, фиксируемых грави- и сейсморазведкой. Можно предположить, что сейсмоструктурные аномалии отражают лишь приподнятую часть объектов в зонах уплотнения, но не отражают эти зоны в их полном объеме. Если такое объяснение приемлемо, то из него следует предположение: должна существовать геологическая причина, приводящая не только к приподниманию изначально плотных пород (например, доломитов тэтэрской свиты), но и к зональному уплотнению любых горных пород на значительном их протяжении. Вероятной причиной такого *сейсмотектонического уплотнения* пород в полосе Ангарских складок могло быть направленное давление одного из субширотных блоков, входящих в Иркинеевско-Чадобецкую рифтовую структуру, развитую вдоль южного склона Байкинской антеклизы. Существование такого блока прямо следует из предложенной модели аномального гравитационного поля Абаканского поднятия (см. рис. 3, а). Без этого блока, падающего по условию модели под углом 30° к северу, невозможно добиться морфологического сходства измеренного и модельного полей.

Также нельзя добиться удовлетворительного сходства морфологии модельного и измеренного полей в пределах Абаканского ЛУ без учета существования к югу от Абаканского поднятия крупной субвертикальной зоны дезинтеграции горных пород, имеющей модельную избыточную плотность около $-0,08 \text{ г/см}^3$, мощность примерно 15 км и протяженность на глубину около 30 км. При этом зона дезинтеграции, вероятно, не выходит на дневную поверхность, так как модельная глубина до ее верхней кромки составляет как минимум 1000 м и не может быть существенно уменьшена без неприемлемого искажения морфологии модельного поля.

Большая протяженность гравитационных аномалий Δ_f -типа подтверждается пока единственным аргументом: конформизмом геометрической структуры гравитационных аномалий Δ_f -типа оси Абаканского поднятия, оси глубинного разлома, контролирующего южный склон этого поднятия, и оси протяженной (58 км) гравитационной аномалии интенсивностью выше 60 мГал (рис. 4). Последняя является восточным продолжением Иркинеевского выступа кристаллического фундамента (положение которого скопировано из работы [3]). Отмеченный конформизм позволяет полагать, что в образовании Абаканского поднятия принимала участие горизонтальная составляющая силы тектоническо-

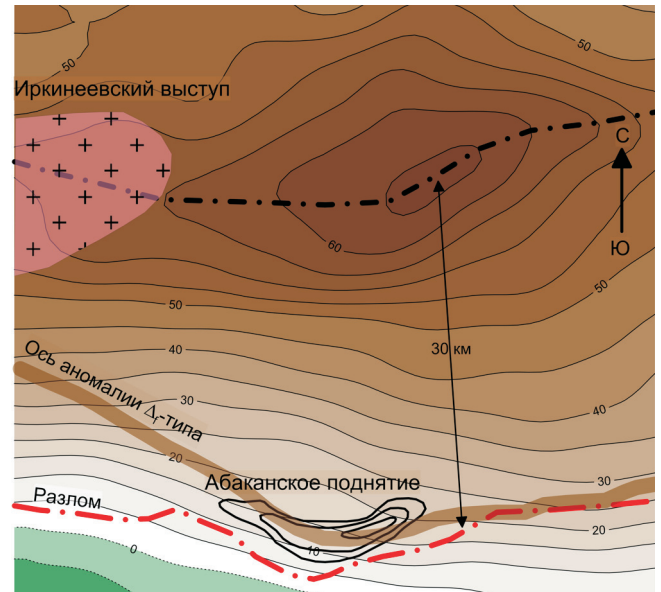


Рис. 4. Конформизм гравитационного поля Байкинской антеклизы и контура Абаканского сейсмоструктурного поднятия

го штампа, действовавшего со стороны южного обрамления Байкинской антеклизы. Это и могло стать причиной формирования протяженной зоны приразломной складчатости, контролирующей брахиантиклинальные поднятия типа Абаканского и Имбинского, а также субширотной полосы слабо-контрастных гравитационных аномалий Δ_f -типа, показанных в данной статье.

Завершая обсуждение полученных результатов, заметим, что интерес к протяженным зонам сейсмотектонического уплотнения горных пород связан с тем, что такие зоны могут быть местами концентрации и *длительного сохранения* коллекторов трещинного типа, а значит, могут быть и эффективными каналами миграции и (при благоприятных литологических условиях) концентраторами ловушек УВ. На наш взгляд, выделение зон, отражающих сейсмотектоническое уплотнение горных пород, – важная задача регионального анализа нефтегазоносности Сибирской платформы с целью поисков в глубоких горизонтах осадочного чехла потенциальных коллекторов трещинного типа¹. Эффективно решить такую задачу можно только при помощи целенаправленного комплексирования сейсморазведки с грави- и магниторазведкой, а кроме того, при помощи геохимии, которая должна сыграть особую роль в этом комплексе, будучи эффективным методом регистрации не только состава УВ, но и *необратимых изменений* вещественного состава горных пород верхней части разреза, связанных с долговременным воздей-

¹ В статье не затронут важный вопрос гидрогенного уплотнения горных пород в процессе метасоматического «залечивания» открытой трещиноватости вторичными минералами. По мнению авторов, оба процесса уплотнения, сейсмотектонического и гидрогенного, взаимосвязаны.



ствии на них восходящих потоков УВ от функционирующих ниже залежей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дюнин, В. И.** Гидрогеодинамика нефтегазонасыщенных бассейнов [Текст] / В. И. Дюнин, В. И. Корзун. – М. : Научный мир, 2005. – 524 с.

2. **Нефтегазоносность** докембрийских толщ Куюмбинско-Юрубчено-Тохомского ареала нефтегазонакопления [Электронный ресурс] / В. В. Харахинов, С. И. Шленкин, В. А. Зеренинов [и др.] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6, № 1. – Точка доступа: http://www.ngtp.ru/rub/4/12_2011.pdf.

3. **Стратиграфия** нефтегазонасыщенных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления [Текст] / Н. В. Мельников, М. С. Якшин, Б. Б. Шишкин [и др.]. – Новосибирск : Акад. изд-во «Гео», 2005. – 428 с.

REFERENCES

1. Dyunin V. I., Korzun V. I. *Gidrogeodinamika neftegazonosnykh basseynov* [Hydrogeodynamics of petroleum basins]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2005. 524 p. (In Russ.).

2. Kharakhinov V. V., Shlenkin S. I., Zereninov V. A., et al. [Oil-and-gas content of Precambrian units of Kuyumba-Yurubchen-Takhomo of areal of oil and gas accumulation]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika – Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*, 2011, vol. 6, no. 1. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/12_2011.pdf. (In Russ.).

3. Melnikov N. V., Yakshin M. S., Shishkin B. B., et al. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Rifey i vend Sibirskoy platformy i ee skladchatogo obramleniya* [Stratigraphy of oil-and-gas bearing basins of Siberia. Riphean and Vendian of Siberian platform and its folded frame]. Novosibirsk, "Geo" Academ. Publ., 2005. 428 p. (In Russ.).

© С. М. Макеев, А. Е. Ануфриев, 2015

МАКЕЕВ Станислав Михайлович, Сибирский федеральный университет, Институт горного дела, геологии и геотехнологий, Красноярск, к. г.-м. н., доцент. *E-mail: smmakeev@mail.ru*

АНУФРИЕВ Алексей Евгеньевич, НПП «Прогнозгеофизика», Красноярск, инженер-геофизик. *E-mail: lexa87@bk.ru*

MAKEEV Stanislav, PhD, Siberian Federal University, Institute of Mining, Geology and Geotechnologies, Krasnoyarsk, Russia. *E-mail: smmakeev@mail.ru*

ANUFRIEV Aleksey, ООО Scientific and Production Enterprise "Prognozgeofizika", Krasnoyarsk, Russia. *E-mail: lexa87@bk.ru*