



УДК 550.834.05:551.2(571.56)

УТОЧНЕНИЕ СТРОЕНИЯ ВИЛЮЙСКОЙ ГЕМИСИНЕКЛИЗЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЕРЕИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

И. А. Губин

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Проанализированы данные глубокого бурения и результаты сейсморазведочных работ МОГТ, выполненных в пределах Вилюйской гемисинеклизы с 1980-х гг. до настоящего времени. Охарактеризованы сейсмогеологические условия. Построена структурная модель осадочного чехла до кровли нижнего кембрия. Выделено пять сейсмогеологических комплексов, приведены карты их толщин. Окончательны области развития мезозойских, пермских, каменноугольных, девонских, силурийских, ордовикских и средне-верхнекембрийских отложений. Строение осадочного чехла Вилюйской гемисинеклизы продемонстрировано на глубинных сейсмогеологических разрезах, построенных на основе детальной скоростной модели, а также с учетом современных и ретроспективных геолого-геофизических данных. Показано ограниченное развитие девонских отложений во внутренних районах гемисинеклизы, где по современным сейсмическим данным под каменноугольными отложениями прогнозируются кембрийские, а сейсмофации, свойственные отложениям Кемпендяйской рифтовой зоны, отсутствуют в волновых полях допермской части разреза.

Ключевые слова: Вилюйская гемисинеклиза, сейсмогеологический комплекс, отражающий горизонт, структурная карта, временной разрез, скоростная модель, осадочный чехол.

REFINEMENT OF THE STRUCTURE OF THE VILYUY HEMISYNECLISE BASED ON THE RESULTS OF REINTERPRETATION OF SEISMIC EXPLORATION

I. A. Gubin

A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The article analyzes the deep drilling data and results of seismic CDP operations performed within the Vilyuy hemisyncline from the 1980s to the present. Seismogeological conditions are characterized. The structural model of sedimentary cover up to the top of the Lower Cambrian is developed. 5 seismic sequences are identified, maps of their thicknesses are presented. Proveniences of Mesozoic, Permian, Carboniferous, Devonian, Silurian, Ordovician and Middle-Upper Cambrian deposits are outlined. The structure of the Vilyuy hemisyncline sedimentary cover is shown on deep seismic-geological sections constructed on the basis of the detailed velocity model, as well as taking into account modern and retrospective geological and geophysical data. The limited development of Devonian deposits in the inner parts of the hemisyncline is shown, where, according to modern seismic data, the Cambrian is predicted under Carboniferous deposits, and seismic facies characteristic of the Kempendyay rift zone deposits are absent in the wave fields of the pre-Permian part of the section.

Keywords: Vilyuy hemisyncline, seismic sequence, reflecting horizon, structure map, reflection-time section, velocity model, sedimentary cover.

DOI 10.20403/2078-0575-2020-4-40-52

До середины XX в. Вилюйская гемисинеклиза рассматривалась как неглубокая плоская впадина. Предполагалось, что толщина мезозойских пород здесь не превышает 1 км, а под ним залегают нефтегазоперспективные кембрийские образования [8]. Продуктивность кембрия Восточной Сибири была доказана еще во второй половине 1930-х гг. В. М. Сенюковым, по рекомендации которого пробурена скважина на Кучугей-Билляхской структуре (Ченкиямская площадь, бассейн р. Толба), давшая несколько сотен литров нефти из кембрийских (сейчас рассматриваемых как вендские) отложений. Вилюйская опорная скважина, пробуренная в 1953 г., перевернула все представления о геологическом строении гемисинеклизы. Она была заложена с целью изучения отложений нижнего палеозоя, однако при забое 2988 м вскрыла породы средней юры [7]. В результате последующих геолого-разведочных

работ выяснилось, что до кровли нижнего палеозоя необходимо пройти еще минимум 7 км.

В 1958–1961 гг. сейсморазведочными работами в центральной части Вилюйской гемисинеклизы было обнаружено крупное Хапчагайское поднятие, осложненное целым рядом локальных структур, каждая из которых, как показало дальнейшее бурение, контролирует газоконденсатные месторождения (Бадаранское, Средневилюйское, Соболох-Неджелинское, Матахское, Толонское). Открытие Хапчагайского вала могло состояться еще до бурения Вилюйской опорной скважины, когда методом отраженных волн был отработан сейсмический профиль вдоль тракта «Якутск – Вилюйск», который показал воздымание отражающего горизонта ТП (граница пермь – триас) к востоку от Вилюйска почти на 1000 м. Однако тогда считалось, что в направлении к Предверхолянскому прогибу могло быть только



погружение, и полученные по профилю данные забраковали [8].

В настоящее время Вилюйская гемисинеклиза рассматривается как крупная краевая и самая глубокая депрессия Сибирской платформы, выполненная осадочным чехлом мощностью до 12–15 км, который является частью Лено-Вилюйского нефтегазоносного бассейна с доказанной промышленной газоносностью верхнепермских, триасовых и нижнеюрских отложений. Практически все открытые месторождения УВ сосредоточены в пределах двух валов – Хапчагайского и Логлорского. Есть основания предполагать, что высоким нефтегазоносным и нефтегазоматеринским потенциалом обладают нижне-среднекембрийские отложения [3, 5, 6, 9, 15, 16 и др.], однако значительная их часть залегает на недоступных для бурения глубинах.

Северо-западный, юго-западный и южный борты Вилюйской гемисинеклизы представляют собой моноклинали – Хоргочумскую, Тюкян-Чебыдинскую и Бескюельскую соответственно. Граница с Предверхоанским краевым прогибом на северо-востоке проведена условно. Геологическое строение осадочного чехла, особенно в пределах бортовых частей гемисинеклизы, изучено сейсморазведкой в комплексе с бурением и другими геолого-геофизическими методами. Однако до сих пор остаются дискуссионными многие вопросы геологического строения внутренних районов, такие как глубины залегания фундамента, масштабы развития девонского рифтогенеза, тектоническая природа валобразных поднятий, характеристика допермского разреза и т. д. [2, 13, 14, 19, 21 и др.].

Структура осадочного чехла Вилюйской гемисинеклизы подробно рассмотрена в работах [4, 5, 10, 11, 14, 16, 21, 22 и др.]. В частности, в монографии [11] под ред. В. С. Суркова было детально проанализировано строение рифейского, вендско-силурийского, девонско-нижнекаменноугольного, среднекаменноугольно-триасового и юрско-мелового мегакомплексов. В статье Г. С. Фрадкина с соавторами [22] выделены байкальский (R), каледонский (V–S), нижнегерцинский (D₂–C₁), верхнегерцинский (C₂–T₂) и мезозойский (T₃–K) мегакомплексы.

Региональные структурные построения по отдельным стратиграфическим уровням выполнялись специалистами ИПНГ РАН, ИГН ЯФ СО АН СССР (ИГАБМ СО РАН), АО «Якутскгеофизика», СНИИГГиМС, ВНИГРИ и др. Тектоническую позицию региона характеризуют структурные карты по горизонтам ТП и Ф (кровля фундамента), хотя последняя носит в значительной мере гипотетический характер. В 2016 г. специалистами ИПНГ СО РАН [18] была построена структурная карта по кровле нефтегазоматеринской куонамской формации (Є₁₋₂) на территорию Якутии.

К настоящему времени накоплен большой объем геолого-геофизического материала, который позволяет существенно уточнить и детализировать структуру осадочного чехла Вилюйской гемисине-

клизы. В предлагаемой статье с учетом архивных и современных геолого-геофизических материалов выполнены региональные структурные построения для территории Вилюйской гемисинеклизы (включая прилегающие районы Предверхоанского прогиба, Алданской и Анабарской антеклиз) для глубин до кровли нижнего кембрия. Предложенный вариант строения осадочного чехла отвечает современной стадии геолого-геофизической изученности. Актуальные структурные построения необходимы для оценки перспектив нефтегазоносности, построения карт градаций катагенеза органического вещества, уточнения нефтегазогеологического и структурно-тектонического районирования, планирования ГРП и уменьшения геологических рисков.

Фактический материал

В качестве стратиграфической основы использовались разбивки скважин, стратифицированных по единой методике, разработанной В. В. Граусман, и частично каталоги СНИИГГиМС, АО «Якутскгеофизика» и ПГО «Ленанефтегазгеология».

В последние годы была существенно пересмотрена стратиграфия кембрия Сибирской платформы [20]. При структурных построениях учитывались обновленные версии стратиграфического расчленения скважин, вскрывших кембрийские породы в пределах исследуемой территории. Проанализированы материалы бурения 405 глубоких и колонковых скважин. Из них подошву мезозоя вскрывают 184 скважины, подошву перми – 42, подошву карбона – 11, подошву силура – девона – 25, кровлю кембрия – ордовика – 37, кровлю куонамской (иниканской) свиты – 13.

В пределах Вилюйской гемисинеклизы большинство сейсмических профилей отрабатывалось в 1980-х гг., но к настоящему времени значительная часть первичных материалов этих исследований не сохранилась, а изученность современной сейсморазведкой низкая (рис. 1). Под современными сейсмическими исследованиями здесь подразумеваются полевые работы и работы по переобработке архивных (ретроспективных) сейсмических данных, выполненные в XXI в. Перечислим наиболее значимые из них.

В 2004 г. специалистами ОАО «Якутскгеофизика» выполнена переобработка сейсморазведочных материалов по региональным маршрутам в пределах Западной Якутии. Общая длина переобработанных профилей составила 833 км.

В 2009 г. специалистами СНИИГГиМС переобработан большой объем сейсморазведочных материалов по региональным маршрутам в Якутии, Красноярском крае и Иркутской области. В рамках проекта по созданию структурно-тектонических моделей палеозоя, венда, рифея и прогноза зон нефтегазоаккумуляции в пределах Сибирской платформы собраны, проанализированы и дообработаны временные разрезы МОГТ в объеме 25000 км, из них 800 км на территории исследования.

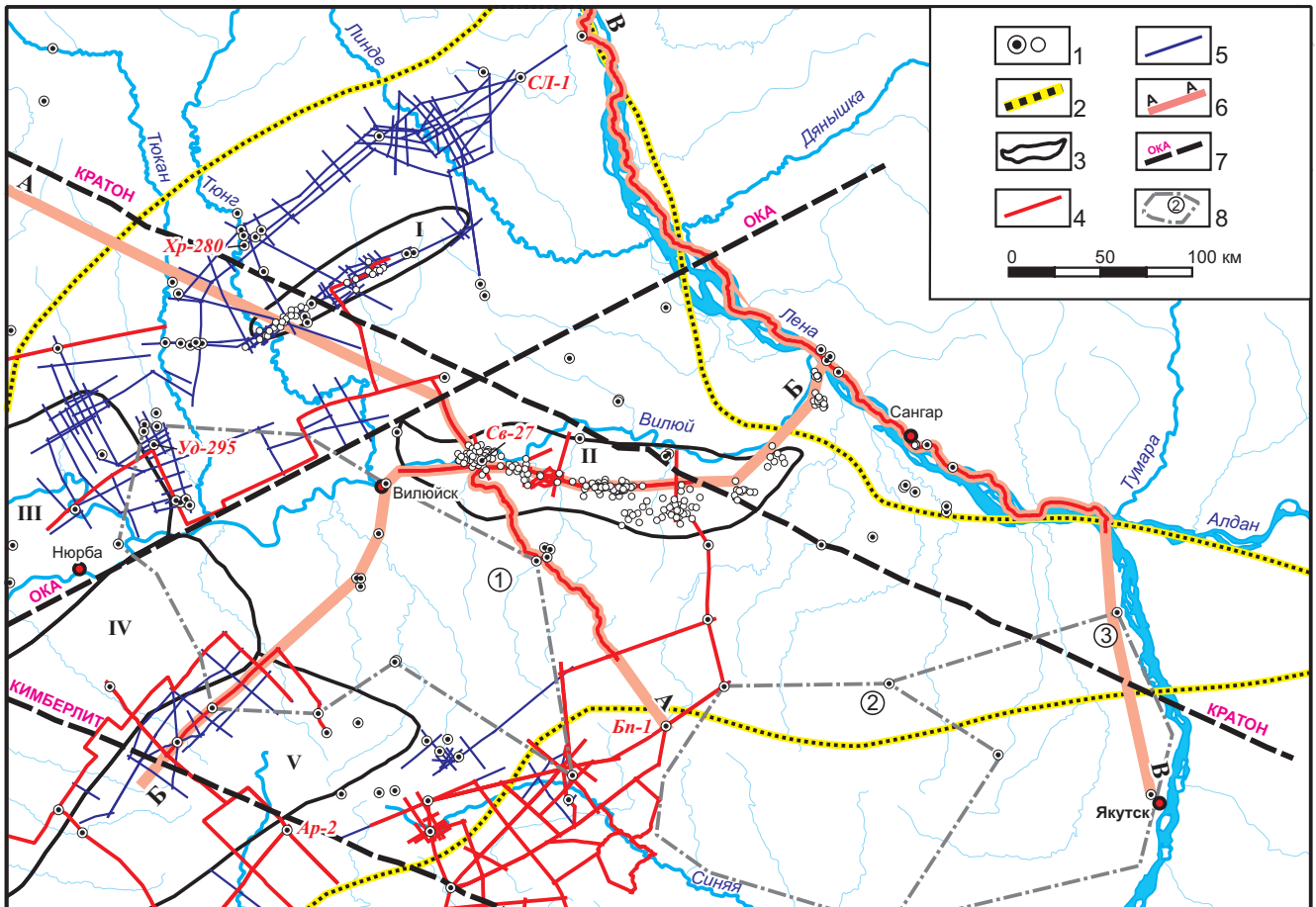


Рис. 1. Схема изученности территории исследования глубоким бурением и сейсморазведкой

1 – скважины глубокого бурения (площади: Ар – Арбайская, Бп – Баппагайская, Св – Средневилюйская, СЛ – Северо-Линденская, Уд – Уданская, Хр – Хоргочумская); 2 – граница Вилюйской гемисинеклизы; 3 – контуры тектонических структур (I – Логлорский вал, II – Хапчагайский мегавал, III – Ыгыаттинская впадина, IV – Сунтарский свод, V – Кемпендяйская впадина); сейсмические профили МОГТ, отработанные и переобработанные: 4 – в 2004–2018 г., 5 – в 1976–1991 гг.; 6 – линии композитных профилей по представленным сейсмогеологическим разрезам; 7 – профили ГСЗ; 8 – объекты ГРП, отработанные по федеральной программе на южном борту гемисинеклизы с 2016 г. (1 – Западно-Вилюйский, 2 – Синский, 3 – Якутский)

В полевом сезоне 2013–2014 гг. по заказу Сибнедр специалистами ОАО «Якутскгеофизика» выполнены комплексные геофизические работы в южной части Вилюйской гемисинеклизы. Объем полевых сейсморазведочных работ составил 459 км. Также частично переобработаны архивные сейсморазведочные материалы МОВ и МОГТ 2D (603 км). Научное сопровождение работ осуществлял ВНИГРИ, обоснование их постановки приведено в [15].

С целью изучения геологического строения и выяснения перспектив нефтегазоносности бассейна р. Лена в полевом сезоне 2017–2018 гг. выполнены речные работы МОГТ 2D общей кратностью 320 с длительностью записи 6 с. Общая длина профиля от с. Кюсюр до устья р. Алдан 1050 км. Полевые сейсморазведочные работы проводились ПГЭ ООО НПП ГА «Луч», обработка и предварительная интерпретация – СНИИГГиМС.

В последние годы южный и юго-западный борта гемисинеклизы изучались предприятиями АО «Росгеология» на объектах, отработанных по федеральной программе: Якутском, Синском и За-

падно-Вилюйском. По мнению специалистов ИПНГ СО РАН [13], эти районы потенциально нефтеносны. Специалистами АО «Якутскгеофизика» предложены объекты для проведения ГРП на Хоргочумской моноклинали и к востоку от Хапчагайского мегавала.

Методика структурных построений

Все доступные геолого-геофизические материалы вошли в единый интерпретационный проект. В процессе работы анализировались данные по делам скважин, ГИС, сейсмокаротажу глубоких скважин, по профилям глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) «Ока», «Кимберлит» и «Кратон» (см. рис. 1).

По скважинам составлялись пластовые скоростные модели, рассчитанные по данным СК-ВСП и АК (рис. 2). В «висячих» скважинах они достраивались до отражающего горизонта Ф по закономерностям, полученным в соседних скважинах, вскрывающих фундамент. Для корректной конверсии «время – глубина» интерполяция пластовых скоростей в межскважинном пространстве осуществлялась

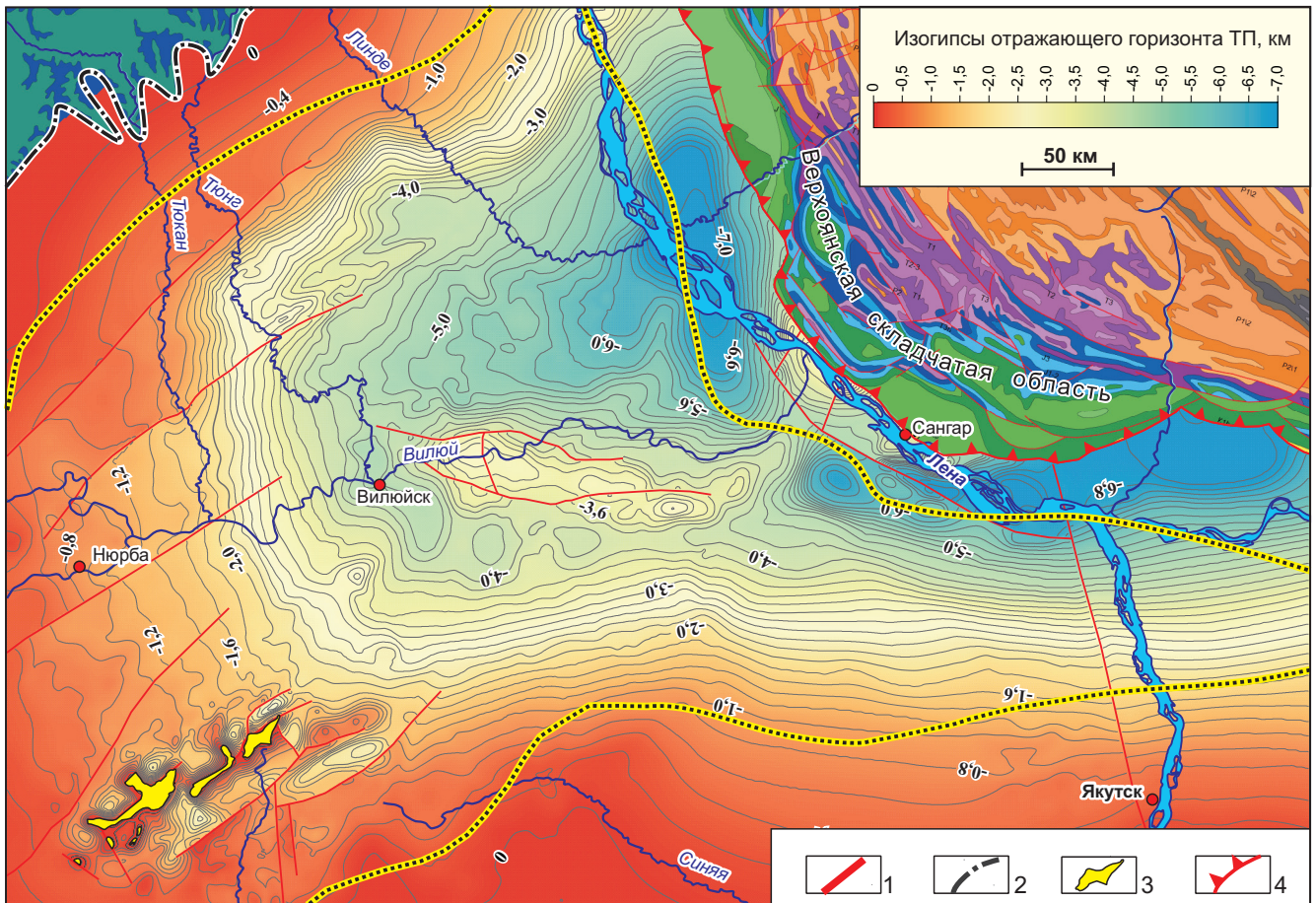


Рис. 3. Структурная карта по отражающему горизонту ТП (подшо́ва мезозоя)

1 – разломы; 2 – граница выходов кембрия на дневную поверхность; 3 – контуры выхода девона, карбона и перми на дневную поверхность; 4 – внешняя граница зоны надвигов со стороны Верхоянской складчатой области; остальные усл. обозн. см. на рис. 1

связанных с ними волн далеко не всегда надежна. Это связано как с глубинными факторами (погружение отражающих границ на глубины до нескольких километров, экранирующее действие вышележащих границ, выклинивание, фациальные изменения и т.д.), так и с поверхностными (повсеместно развитая зона многолетнемерзлых пород (ММП) и широкое распространение барханных песков) [1].

ММП характеризуются крайне резкой пространственной изменчивостью и достигают глубины 1000 м. Участки монолитной мерзлоты хаотично сменяются зонами растеплений, поэтому пластовые и средние скорости здесь меняются от 1,5–1,8 до 3,5–3,7 км/с, чаще принимая промежуточные значения. Зона ММП, особенно в областях перехода от мерзлых пород к талым, является источником весьма интенсивных волн-помех (кратных, обменных, рефрагированных и др.).

Формирование отражающих горизонтов (ОГ) в верхней части разреза связано с переслаиванием терригенно-угленосных пород мезозойско-верхнепалеозойского возраста. Глубже, в отложениях кембрия и протерозоя, ОГ образуются на границах высокоскоростных (известняки, доломиты, ангидриты) и низкоскоростных (терригенных или соленосных) пород.

В результате выполненного анализа и обобщения предыдущих работ по интерпретации сейсмических данных были выбраны и прослежены на временных разрезах следующие основные отражающие горизонты (сверху вниз): М – подошва меловых отложений, ЮТ – граница юры и триаса, ТП – поверхность регионального несогласия (соответствует подошве мезозоя); П – подошва перми; С – подошва карбона; ДК – поверхность регионального несогласия (на большей части территории соответствует эродированной кровле кембрия); К – вблизи границы нижнего и среднего кембрия. В качестве дополнительных были прослежены ОГ М₂ (кровля нижнего мела), П₁ (кровля нижней перми), Б (кровля венда), КВ (кровля терригенного комплекса венда – нижнебюкской подсвиты), Ф (поверхность фундамента).

Поскольку основные отражающие горизонты не имеют строгой привязки к конкретным стратиграфическим стратонам по всей площади, необходимо сделать соответствующие пояснения.

Отражающий горизонт ТП в центральных районах гемисинеклизы соответствует границе перми и триаса, во внешней зоне – подошве юры, залегающей на размытой поверхности палеозоя и докембрия. Его стратиграфическая приурочен-



ность – от подошвы неджелинской свиты нижнего триаса до подошвы кызылсырской (укугутской) свиты нижней юры.

ОГ П, так же как и ТП, маркирует поверхность регионального несогласия, которое, вероятно, отсутствует только в центральных районах гемисинеклизы, где по данным бурения Средневилуйской скв. 27 горизонт приурочен к подошве юнкюрской свиты нижней перми, подстилаемой юрэнской свитой верхнего карбона. В пределах Тюкян-Чыбыдинской моноклинали и Кемпендяйской впадины горизонт ассоциируется с подошвой логлорской свиты верхней перми, залегающей на породах с возрастным диапазоном от позднего кембрия до позднего девона, или с подошвой тогойдохской свиты верхней перми, залегающей, как правило, на размытой поверхности верхнего девона. В пределах Хоргочумской моноклинали ОГ П приурочен к подошве хомустахской свиты верхней перми, которая перекрывает мохсоголохскую серию.

Мохсоголохская серия, по В. В. Граусман (1994), охватывает возрастной диапазон от среднего карбона до ранней перми, развита на Логлорском валу, Тюкян-Чыбыдинской моноклинали и в северо-восточной части Кемпендяйской впадины, где к ее подошве приурочен ОГ С. В остальных районах этот горизонт приурочен к подошве курунгурахской свиты нижнего карбона, залегающей несогласно на верхнедевонских отложениях. Табасындская свита также имеет переходный возраст от позднего карбона до ранней перми. Она слагает крылья солянокупольных структур Кемпендяйской впадины, залегающей на курунгурахской свите нижнего карбона и перекрывается кызылсырской свитой нижней юры. Мохсоголохская серия вместе с табасындской свитой в настоящей работе включены в каменноугольный сейсмогеологический комплекс.

Граница кембрия и ордовика проводится внутри балыктахской и олдондинской свит [20]. Мощность залегающей на них станской свиты среднего ордовика не превышает 90 м. Эти свиты перекрыты толщами, имеющими возраст от силура до юры. Поэтому ОГ ДК проведен по кровле ордовика там, где он сохранился от размыва (на Южно-Сагытайской, Среднеконончанской, Усть-Мархинской, Меикской и других площадях). На большей части территории исследований отложения ордовика отсутствуют, и горизонт ДК проводится по эродированной (вплоть до нижнего отдела) поверхности кембрия, который на периферийных участках гемисинеклизы выходит на дневную поверхность.

Стратификация ОГ К зависит от фациального районирования ниже-среднекембрийских отложений Сибирской платформы [20]. Он отождествляется с кровлей чарской свиты в пределах Туруханско-Иркутско-Олекминской фациального региона, с кровлей толщи водорослево-зернистых известняков, кумахской и удачинской свит в пределах Западно-Якутской барьерно-рифовой системы (Анабаро-

Синский фациальный регион), а также с кровлей иниканской и куонамской свит в пределах Юдомо-Оленекского фациального региона.

Все выделенные отражающие горизонты приурочены к относительно резким изменениям пластовых скоростей ($V_{пл}$), которые фиксируются по данным АК и ВСП (см. рис. 2). В терригенном разрезе мезозоя и верхнего палеозоя пластовые скорости с глубиной имеют тенденцию сначала к падению, а затем к возрастанию, что связано с сочетанием двух факторов – наличием ММП и эффектом геостатического уплотнения осадочных горных пород, который особенно отчетливо выражен в разрезе Средневилуйской скв. 27, где были получены уникальные данные по скоростям продольных волн до глубины 6,5 км. Здесь значения $V_{пл}$ плавно нарастают с 2,3 до 4,9 км/с. Закономерность монотонного роста скоростей нарушают зона ММП, которая охватывает практически всю часть верхнего мела, и интервалы повышенной угленосности и глинистости в перми и карбоне (см. рис. 2).

Основным генератором отраженных волн на разрезах ВСП в пределах Хапчагайского мегавала являются юрские отложения, внутри которых наблюдается максимальный скачок скоростей на границе средней и нижней юры. На временных сейсмических разрезах протяженными осями синфазности наиболее насыщена пермская часть разреза.

Поведение $V_{пл}$ в отложениях палеозоя и протерозоя бортовых районов гемисинеклизы существенно отличается от закономерностей, установленных для мезозойских и верхнепалеозойских толщ. Здесь явно намечается связь значений $V_{пл}$ с литологическим составом пород, который отличается крайним разнообразием и часто определяет наблюдаемую скоростную дифференциацию, а эффект уплотнения играет существенно меньшую роль либо отсутствует.

Наиболее дифференцированными в скоростном отношении являются образования от ордовика до нижнего карбона. Отложения северо-западного борта гемисинеклизы и Кемпендяйской впадины характеризуются значениями $V_{пл}$ 3,2–3,8 км/с. На южном борту (Кумахская площадь) скорости в аналогичных отложениях гораздо выше – до 4,0–4,2 км/с. Появление в терригенно-карбонатных отложениях пропластков и пластов интрузивного состава (диабазы, базальты и т. д.) повышает значения $V_{пл}$ до 5,0–5,5 км/с (Хоргочумская, Тюкян-Тюнгская, Восточная и другие площади). Аналогичное влияние оказывают пласты каменных солей в отложениях девона Кемпендяйской впадины, повышая значения $V_{пл}$ до 4,3 км/с и выше.

Кембрийские отложения Ыгыаттинской впадины и южного борта гемисинеклизы (Кумахская, Баппагайская, Андреевская и другие площади) представлены преимущественно карбонатами. Значения пластовой скорости в них по сравнению с отложениями верхнего палеозоя и мезозоя существенно выше (см. рис. 2). В отложениях среднего – верхне-

го кембрия $V_{пл}$ изменяется в пределах 4,3–5,2 км/с, а нижнекембрийские отложения характеризуются значительно большими скоростями – 5,8–6,2 км/с, достигая максимальных значений 6,7 км/с в массивных водорослевых известняках, слагающих одноименную толщу на Синской площади, удачинскую и баппагайскую свиты, а также в известняках и доломитах синско-куторгиновой толщи.

Протерозойские отложения, изученные на севере Ыгыаттинской впадины и на южном борту гемисинеклизы (Баппагайская, Северо-Наманинская площади), близки к породам нижнего кембрия по литологическому составу и по значениям пластовых скоростей (5,8–6,0 км/с).

Сейсмогеологические комплексы, строение осадочного чехла

Под сейсмогеологическим комплексом мы традиционно понимаем осадочный (седиментационный) комплекс, который можно выделить и проследить на временных разрезах, где интервал его развития, как правило, характеризуется однотипным рисунком сейсмической записи, а в кровле и подошве он ограничен устойчивыми

отражающими горизонтами, приуроченными либо к выдержанным по составу и толщине согласно залегающим пачкам глинистого, галогенного или карбонатного состава, либо к поверхностям регионального несогласия. Понятие осадочного комплекса в сеймостратиграфическом анализе подробно рассмотрено в работе [12].

В пределах Вилюйской гемисинеклизы было выделено пять сейсмогеологических комплексов, для каждого из которых строились соответствующие карты толщин (ΔH): мезозойский – ΔH (ТП-О); пермский – ΔH (П-ТП) (рис. 4, а); каменноугольный – ΔH (С-П) (см. рис. 4, б); силурийско-девонский – ΔH (ДК-С) (см. рис. 4, в) и среднекембрийско-ордовикский – ΔH (К-ДК) (см. рис. 4, г).

Основой для их построения послужили глубинные сейсмогеологические разрезы. В качестве примера на рис. 5 приведены разрезы, характеризующие строение различных районов Вилюйской гемисинеклизы, по профилям: А–А, который проходит через Логлорский вал и Хапчагайский мегавал; Б–Б, который идет от Кемпендяйской впадины до Китчанского выступа, и В–В, который проходит вдоль р. Лена и оканчивается на Якутском своде.

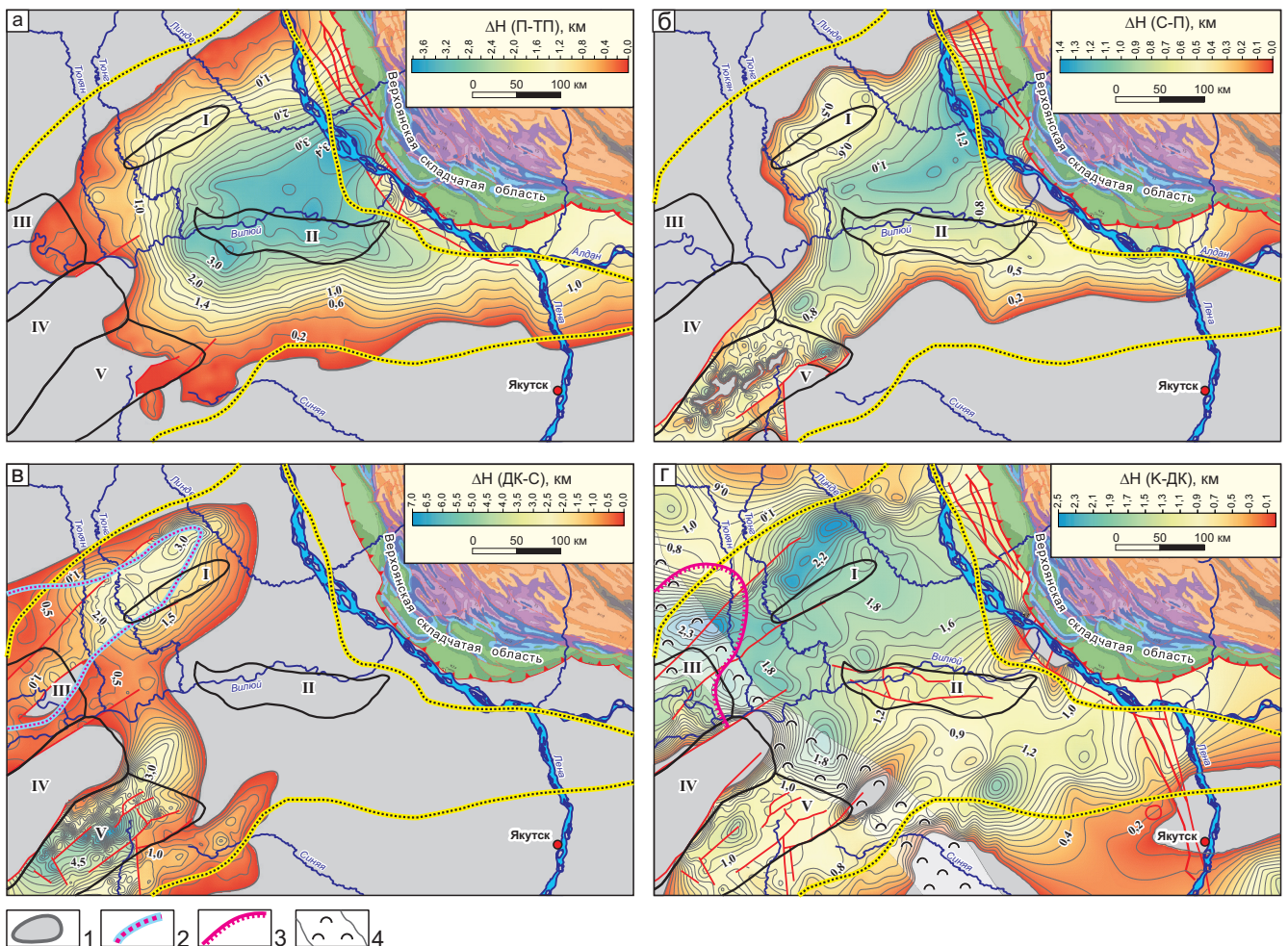


Рис. 4. Карты толщин сейсмогеологических комплексов: а – пермского, б – каменноугольного, в – силурийско-девонского, г – среднекембрийско-ордовикского

1 – зоны отсутствия отложений; границы развития отложений: 2 – силура, 3 – ордовика; 4 – Западно-Якутская барьерно-рифовая система; остальные усл. обозн. см. на рис. 1, 3

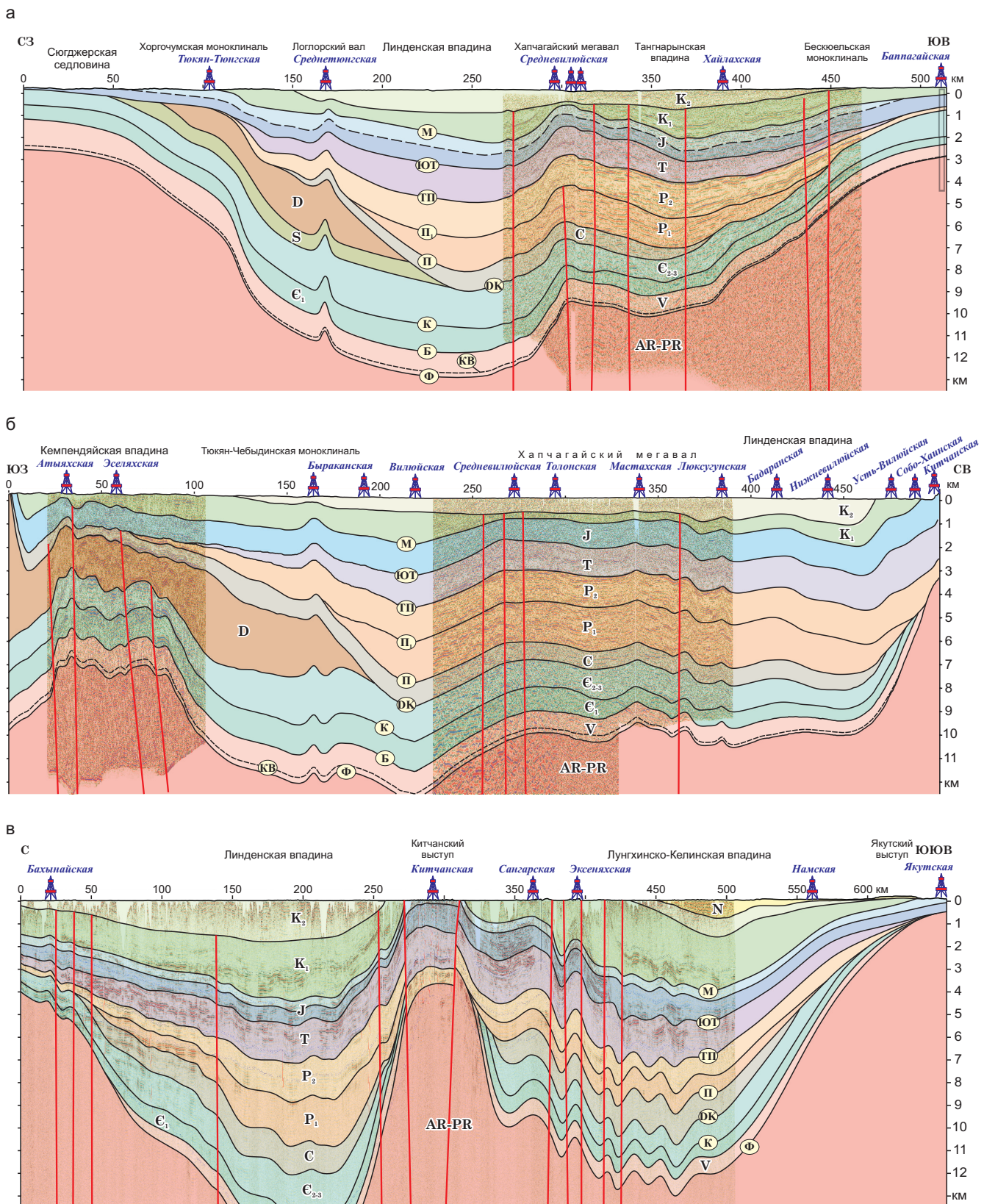


Рис. 5. Глубинный сейсмогеологический разрез по линиям профилей А–А (а), Б–Б (б) и В–В (в)

По строению осадочного чехла Вилюйскую гемисинеклизу можно условно разделить на три зоны: внутреннюю, внешнюю и переходную.

Для **внутренней** зоны (Хапчагайский мегавал, Линденская, Тангнарынская и Лунгхинско-Келинская впадины) характерны значительные мощности осадочного чехла при относительно большом вкладе

верхнепалеозойских и мезозойских образований. Толщины ниже- и среднепалеозойских отложений заметно ниже (около 2–3 км).

Мезозойский комплекс в пределах внутренней зоны представлен чередованием пород песчано-глинистого состава, в верхней половине (верхняя юра – мел) угленосных. Их мощность постепен-

но увеличивается в северо-восточном направлении, достигая 5–6 км в Предверхоанском прогибе (см. рис. 3). Верхнепалеозойские образования представлены в основном отложениями пермской системы. Мощность их также последовательно увеличивается в северо-восточном направлении, достигая 2–3 км (см. рис. 4, а).

Анализ конфигурации отражающих горизонтов, прослеженных на глубинных сейсмогеологических разрезах (см. рис. 5), показал, что наблюдается прямая унаследованность структурами осадочного чехла структур фундамента. При формировании этих структур определяющую роль играют глубинные разломы. Интенсивнее всего процессы тектономагматической активизации протекали при формировании верхнеюрско-нижнемелового комплекса [3]. О значительных подвижках по зонам разломов можно судить, в частности, по изменению мощности нижнемеловых пород. Так, по материалам глубоких скважин, находящихся на расстоянии первые десятки км друг от друга, мощность отложений нижнего мела в погруженной части гемисинеклизы достигает 1450 м, а на приподнятых блоках составляет лишь 100 м (см. рис. 5, а). Амплитуда большинства выделенных глубинных разломов затухает в нижнем мелу.

По результатам интерпретации современных сейсмических данных прогнозируется блоковое строение фундамента под Хапчагайским мегавалом (ряд исследователей считают его «бескорневым»). Связь Хапчагайского и Логлорского валов с особенностями глубинного строения кристаллического фундамента подтверждалась ранее по результатам кластерного анализа магнитного поля и геоплотностного моделирования [2].

По отражающему горизонту ТП Хапчагайский мегавал оконтуривается по изогипсе –3800 м, а его амплитуда составляет около 900 м (см. рис. 3). Структура вытянута в широтном направлении более чем на 160 км. В поперечном сечении мегавал асимметричен: его северное крыло круче южного (см. рис. 5, а). Бадаранская и Нижневилюйская структуры находятся на восточном продолжении мегавала, замыкаясь на более глубоких уровнях.

Шарнир Логлорского вала погружается в северо-восточном направлении, вследствие чего структура полностью замыкается в рельефе ОГ ТП только по изогипсе –2700 м на Среднетюнгской площади, где открыто одноименное газоконденсатное месторождение, а сам наклонный вал прослеживается вплоть до отметок –4200 м (см. рис. 5, а). Общая протяженность вала превышает 100 км при амплитуде 250 м.

Строение северо-восточной части Вилюйской гемисинеклизы представлено на разрезе по линии В–В (см. рис. 5, в), в основу которого положены материалы по речному сейсмическому профилю вдоль р. Лена. Прежде всего следует отметить принципиальное различие в структуре осадочного чехла,

слагающего Линденскую и Лунгхинско-Келинскую впадины, разделенные Китчанским выступом.

Глубина Линденской впадины достигает 14–15 км, что соответствует положению отражающей границы на профиле ГСЗ «Ока» в месте пересечения с Ленским речным профилем, а деформированность слагающих ее осадочных комплексов существенно меньше, чем в Лунгхинско-Келинской. Здесь фиксируется близкое к субгоризонтальному или слабонаклонное залегание толщ, локальные структуры маловыразительны, а разрывные нарушения не имеют большой амплитуды. Мощность меловых отложений в центральных районах обеих впадин достигает наибольших значений для всей Вилюйской гемисинеклизы – более 4 км.

Максимальная глубина Лунгхинско-Келинской впадины около 12 км. Амплитуды развитых в ее пределах брахиантиклинальных структур достигают 1 км и более. Как правило, они осложнены глубинными разломами, проникающими в нижнемеловые отложения. Часть положительных структур была закартирована еще в конце 1950-х – начале 1960-х гг. по результатам интерпретации данных МОВ и потенциальных полей и заверена бурением на Олойской, Бергеинской, Сангарской, Эксеяхской площадях. На первых двух были получены притоки нефти из верхнеюрско-нижнемеловых отложений. В Линденской впадине подобные структуры отсутствуют.

Асимметричность строения двух впадин проявляется также и в различной мощности осадочных комплексов. Например, в пределах Линденской впадины мощность пермских отложений максимальна и превышает 3,5 км, а в Лунгхинско-Келинской составляет около 2 км (см. рис. 4, а). Резко различаются мощности и верхнемелового комплекса.

Под пермскими отложениями залегает карбон, средний и верхний отделы которого обнажаются на дневной поверхности в Верхоянской складчатой области. Мы предполагаем, что в пределах исследуемой территории развитие нижнекаменноугольных отложений, вскрытых на Кемпендяйской, Атыяхской, Эсеяхской и Кэдэпчикской площадях, ограничено контурами Кемпендяйской впадины, поскольку на Тюкян-Чебыдинской моноклинали карбон представлен только мохсоголохской серией. При приближении к бортовым участкам гемисинеклизы отложения карбона быстро выклиниваются (см. рис. 4, б), и здесь под пермскими породами залегают кембрийские, что подтверждается результатами бурения на Северо-Линденской, Уданской, Бапчагайской и других площадях.

Отложения нижнего кембрия имеют площадное развитие в пределах всей Вилюйской гемисинеклизы за исключением Китчанского выступа, Сунтарского и Якутского сводов. Среднекембрийско-ордовикские породы сильно изменчивы по толщине вследствие постседиментационных размывов – от 0 до 2,5 км (см. рис. 4, г).

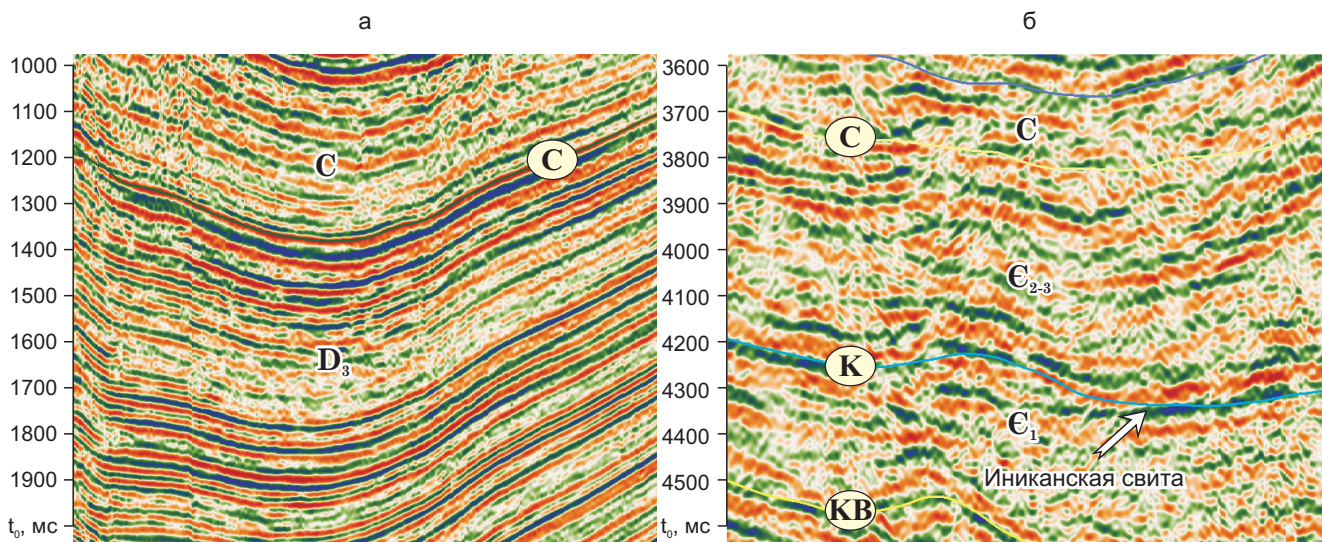


Рис. 6. Волновая картина, характерная для девонского комплекса Кемпендяйской впадины (а) и допермских отложений Хапчагайского мегавала (б)

Переходная зона (Хоргочумская, Тюкян-Чебыдинская и Бескюельская моноклинали) характеризуется крутым, флексуобразным строением. В ее пределах отмечается нарастание мощности в сторону общего погружения не только мезозойских и пермских отложений, но и более древних палеозойских. Для данной зоны характерны структурные элементы почти исключительно незамкнутых форм (структурные выступы, заливы и др.) и региональное выклинивание пермских и мезозойских отложений (см. рис. 5, а, б).

Наиболее резкий перегиб рельефа осадочных комплексов отмечается в пределах Хоргочумской моноклинали. По ОГ ТП максимальный градиент здесь достигает значений 0,11 км/км, а по кембрийским уровням (ОГ К, ДК) он в несколько раз выше – до 0,37 км/км за счет появления в разрезе девона, карбона, перми и увеличения толщин триаса в направлении к центральным районам Вилюйской гемисинеклизы.

Для **внешней** зоны (Сунтарский свод, Ыгыаттинская и Кемпендяйская впадины, Сарсанский прогиб) характерно пологое залегание мезозойских отложений с небольшими (1–5°) наклонами слоев в сторону внутренней зоны гемисинеклизы, осложненное соляной тектоникой в пределах Кемпендяйской впадины (см. рис. 3, 5, б). Здесь в разрезах уже отсутствуют или значительно сокращены пермские, триасовые и меловые отложения, уменьшается также мощность юрских образований, резко несогласно залегающих на породах палеозойского возраста.

Мощность осадочного чехла в Кемпендяйской впадине достигает 8 км и более, в основном за счет среднепалеозойских отложений, сформированных во время становления Вилюйской рифтовой системы [4]. Это вулканогенно-осадочные, галогенные и магматические образования среднего девона – нижнего карбона. Сейсмические исследования последних лет указывают на отсутствие девонско-

силурийского комплекса в центральных районах Вилюйской гемисинеклизы (см. рис. 4, в). Максимальные толщины девона (более 5 км), рифтогенный генезис которых подвергается критике [19], фиксируются только в пределах Кемпендяйской впадины. Присутствие здесь большого количества эвапоритов вызвало проявление солянокупольной тектоники, в результате чего соли и перекрывающие девонские отложения оказались выведенными на дневную поверхность. Наиболее представительный разрез этих отложений вскрыт Кемпендяйской структурно-поисковой скважиной. Для них характерна волновая картина, насыщенная протяженными высокоамплитудными отражающими горизонтами, обусловленными выдержанным чередованием пластов каменных солей, гипсов, ангидритов, гипсов, туфов и других вулканогенно-осадочных пород (рис. 6, а). Подобной волновой картины не наблюдается в других районах Вилюйской гемисинеклизы, в том числе и в пределах Хапчагайского мегавала, где в последние годы получены качественные сейсмические данные (см. рис. 6, б). Реперный отражающий горизонт К, связанный с иниканской свитой кембрия, надежно прослеживается от Баппагайской площади, где он вскрыт скважиной, до внутренних районов гемисинеклизы.

Девонские отложения в составе Кемпендяйского рифтового комплекса быстро выклиниваются к северо-востоку от Кемпендяйской впадины (см. рис. 5, б). Как отмечал В. С. Старосельцев, «попытки удлинить эту систему на северо-восток в глубоко погруженную Вилюйскую гемисинеклизу не аргументированы однозначно...» [19]. Глубины фундамента в пределах Хапчагайского мегавала по сейсморазведочным данным прогнозируются на уровне 10–12 км (см. рис. 5, а, б). Это согласуется с данными ГСЗ, МТЗ и результатами интерпретации гравимагнитных аномалий, устанавливающими предельную глубину фундамента в центральных райо-

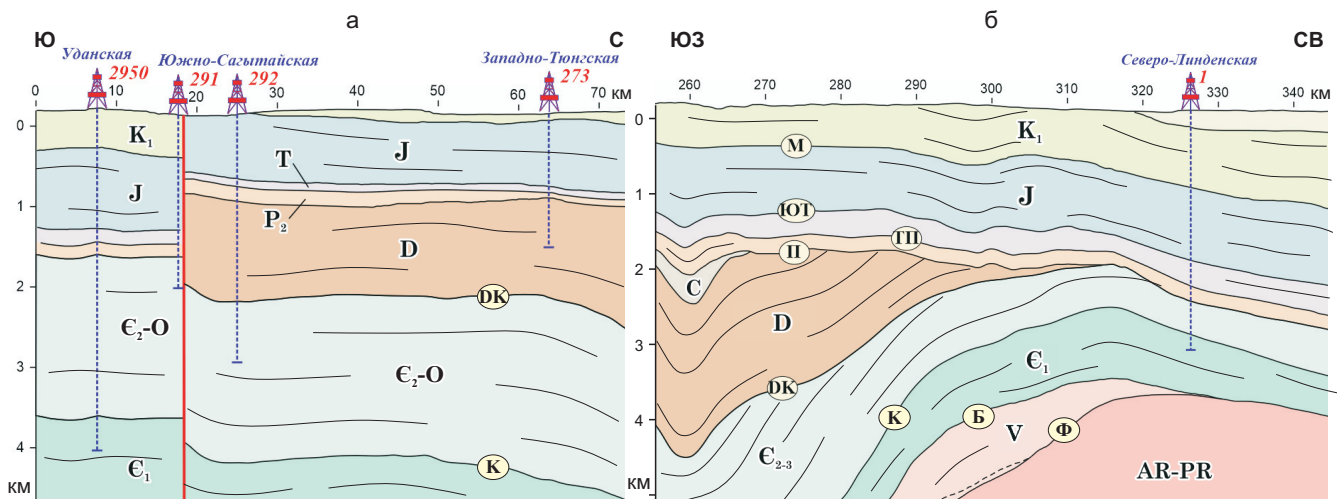


Рис. 7. Характер выклинивания девонских отложений в пределах Южно-Сагытайской (а) и Северо-Линденской (а) площадей по данным бурения и результатам интерпретации ретроспективных сейсмических данных

нах гемисинеклизы на уровне примерно 12 км. При сохранении мощности девона в районе Хапчагайского мегавала мощность осадочного чехла должна была бы увеличиться до 15–16 км.

К северо-востоку от Сунтарского свода девонские отложения сохраняются в виде перемычки и их мощность не превышает 800 м, что подтверждают результаты последних сейсморазведочных работ [17].

Девонские отложения в составе Ыгыаттинского рифтового комплекса имеют большую протяженность на северо-восток, захватывая практически всю территорию Хоргочумской моноклинали (см. рис. 4, в). Они также резко выклиниваются, либо срезаясь разломом (рис. 7, а), либо под углом выходя на предпермскую поверхность регионального размыва (см. рис. 7, б). Их мощность существенно меньше, чем в Кемпендяйской впадине (до 3 км вместе с отложениями силура при средних значениях 0,5–1 км). На Северо-Линденской площади девонские отложения отсутствуют и появляются только восточнее Джарджанского поднятия, о чем свидетельствуют гипс-ангидритовые диапиры с обломками девонских известняков и базальтов [21].

Выводы

В процессе исследований обобщены и частично переинтерпретированы «в одну руку» результаты сейсморазведочных работ МОГТ, выполненных в пределах Вилюйской гемисинеклизы с 1980-х гг. до настоящего времени. На временных разрезах выделены и прослежены реперные отражающие горизонты (ТП, П, С, ДК, К и др.), обоснована их стратификация с учетом обновленных стратиграфических разбивок по скважинам.

Построенная структурная модель осадочного чехла до кровли нижнего кембрия включает серию глубинных сейсмогеологических разрезов, структурные карты и карты изопакит пяти сейсмогеологиче-

ских комплексов (мезозойского, пермского, каменноугольного, силурийско-девонского и среднекембрийско-ордовикского).

Актуализирована структурная поверхность по подошве мезозоя, определены контуры развития пермского сейсмокомплекса, который выклинивается на бортах гемисинеклизы. Зоны выклинивания могут рассматриваться как объекты нефтегазопроисловых работ. Толщины комплекса изменяются от 0 до 3,7 км.

Каменноугольный сейсмокомплекс протягивается на северо-восток в виде полосы шириной около 100 км от Кемпендяйской впадины, где он включает отложения нижнего карбона, во внутренние районы гемисинеклизы, где область его распространения существенно увеличивается. Вулканогенно-карбонатно-терригенные сульфатонесные отложения нижнего карбона (курунгуряхская свита) отмечены только в указанной впадине. Максимальная мощность комплекса – 1,4 км.

Девонско-силурийский сейсмокомплекс развит в Кемпендяйской, Ыгыаттинской впадинах и на Хоргочумской моноклинали. Толщины его изменяются в широких пределах – от 0 до 7 км. Отложения девона интенсивно разбиты разломами, выклиниваются, как правило резко, за счет формирования в грабенах (Кемпендяйском, Южно-Сагытайском). По современным сейсмическим данным нет существенных оснований продолжать структуры Ыгыаттинско-Сунтарско-Кемпендяйской рифтовой зоны во внутреннюю зону Вилюйской гемисинеклизы.

Среднекембрийско-ордовикский комплекс развит на большей части гемисинеклизы (собственно ордовик отмечен только в Ыгыаттинской впадине). Во внутренних районах кембрий залегает непосредственно под пермско-каменноугольными отложениями и, вероятно, не затронут процессами позднедевонского рифтогенеза, что имеет принципиальное значение при оценке его нефтегазоматеринского и нефтегазоносного потенциала. Для от-

вета на этот вопрос требуется отработка сети региональных профилей, секущих весь чехол Вилюйской гемисинеклизы, и бурение глубоких параметрических скважин, вскрывающих кембрий.

Глубины фундамента в пределах Вилюйского осадочного бассейна достигают 12–15 км в наиболее погруженных районах гемисинеклизы (Линденская и Лунгхинско-Келинская впадины) и 10 км в пределах Хапчагайского мегавала.

Работа выполнена в рамках базового проекта научно-исследовательских работ № АААА-А19-119111490040-5 «Построение моделей геологического строения и оценка перспектив нефтегазоносности фанерозойских и неопротерозойских осадочных комплексов Лено-Тунгусской НГП для формирования программы геолого-разведочных работ и лицензирования недр» при поддержке гранта РФФИ «Ресурсы Арктики», проект № 18-05-70105.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беленький В. Я., Кунин Н. Я.** Пути повышения эффективности сейсморазведки при подготовке структур в Западной Якутии // Геология нефти и газа. – 1978. – № 5. – С. 22–30.
2. **Берзин А. Г.** Особенности размещения залежей углеводородов и природы геологических структур в Западной Якутии. – Новосибирск: Наука, 2011. – 255 с.
3. **Влияние** мезозойской тектоно-магматической активизации на нефтегазоносность чехла центральной части Вилюйской синеклизы / Н. Н. Алексеев, Н. Н. Гаврильев, В. А. Михайлов и др. // Нефтегазоносные отложения Западной Якутии: сб. науч. тр. / ЯФ СО АН СССР. – Якутск, 1982. – С. 98–108.
4. **Гайдук В. В.** Вилюйская среднепалеозойская рифтовая система. – Якутск: ЯФ СО АН, 1988. – 128 с.
5. **Геология** нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука. – М.: Недра, 1981. – 552 с.
6. **Геохимические** предпосылки нефтеносности кембрийских отложений Лено-Амгинского междуречья (юго-восток Сибирской платформы) / Т. М. Парфенова, И. В. Коровников, В. Н. Меленевский, В. Г. Эдер // Геология нефти и газа. – 2009. – № 1. – С. 87–91.
7. **Граусман А. А., Аржаков М. И., Туги Э. Р.** Как это было // Открытие нефти и газа в Якутии. – Новосибирск: Сибтехнорезерв, 2002. – С. 5–31.
8. **Забалуев В. В.** В поисках якутского газа // Открытие нефти и газа в Якутии. – Новосибирск: Сибтехнорезерв, 2002. – С. 164–180.
9. **Каширцев В. А.** Органическая геохимия нефтяных восточных Сибирской платформы. – Якутск: ЯФ СО РАН, 2003. – 160 с.
10. **Лено-Вилюйская** нефтегазоносная провинция / под ред. А. А. Трофимука и др. – М.: Недра, 1969. – 279 с.
11. **Мегакомплексы** и глубинная структура земной коры нефтегазоносных провинций Сибирской платформы / под ред. В. С. Суркова. – М.: Недра, 1987. – 204 с.
12. **Митчем Р. М.-мл., Вейл П. Р., Томпсон С. Ш.** Осадочный комплекс как основная единица при стратиграфическом анализе // Сейсмическая стратиграфия / под ред. Ч. Пейтона. Т. 1. – М.: Мир, 1982. – С. 108–126.
13. **Новейший** прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилюйской синеклизы / В. С. Ситников, Н. Н. Алексеев, К. А. Павлова и др. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12, № 1. – Точка доступа: http://www.ngpt.ru/rub/6/9_2017.pdf.
14. **Особенности** строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Вилюйского нефтегазоносного бассейна / С. В. Фролов, Е. Е. Карньюшина, Н. И. Коробова и др. // Георесурсы. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 13–30.
15. **Перспективы** нефтеносности южной части Вилюйской синеклизы / В. С. Ситников, О. М. Прищепа, И. А. Кушмар, А. В. Погодаев // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 7. – С. 22–28.
16. **Протопопов Ю. Х.** Тектонические комплексы чехла Вилюйской синеклизы: автореф. дис. ... к. г.-м. н. – Новосибирск, 1989. – 16 с.
17. **Сивцев А. И.** Перспективы нефтегазоносности северо-восточного склона Сунтарского поднятия // Матер. IX Всерос. науч.-практ. конф. – Якутск, 2019. – С. 260–263.
18. **Сивцев А. И., Зуева И. Н., Чалая О. Н.** Структурная карта по толщинам и глубинам залегания кровли Куонамской горючесланцевой формации // Матер. VII Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию ИГА-ИБМ СО РАН. – Якутск, 2017. – С. 233–237.
19. **Старосельцев В. С.** Проблема выделения рифтогенных прогибов – перспективных тектонических элементов активного нефтегазообразования // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 4. – С. 475–483.
20. **Стратиграфия** нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы / С. С. Сухов, Ю. А. Шабанов, Т. В. Пегель и др. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2016. – 497 с.
21. **Тектоника**, геодинамика и металлогения Республики Саха (Якутия) / под ред. Л. М. Парфенова, М. И. Кузьмина. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 571 с. – Точка доступа: http://diamond.yasn.ru/wp-content/Bibl/Tectonics_geodynamics_metallogeny_2001.pdf.
22. **Тектоническое** положение и природа Вилюйской синеклизы / Г. С. Фрадкин, М. В. Болдырев, В. В. Гайдук и др. // Геология и геофизика. – 1984. – № 1. – С. 38–50.

REFERENCES

1. Belenkiy V.Ya., Kunin N.Ya. [Ways to improve the efficiency of seismic survey when preparing structures in Western Yakutia]. *Geologiya nefi i gaza – Oil and gas geology*, 1978, no. 5, pp. 22–30. (In Russ.).



2. Berzin A.G. *Osobennosti razmeshcheniya za- lezhey uglevodorodov i prirody geologicheskikh struk- tur v Zapadnoy Yakutii* [Features of the hydrocarbon accumulation allocation and the nature of geological structures in Western Yakutia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011. 255 p. (In Russ.).
3. Alekseev N.N., Gavrilyev N.N., Mikhaylov V.A., et al. [Influence of the Mesozoic tectonomagmatic activation on petroleum potential of the cover in the central Vilyuy syncline]. *Neftegazonosnye otlozheniya Zapadnoy Yakutii* [Petroleum deposits of the Western Yakutia]. Yakutsk, YB SB AS USSR Publ., 1982, pp. 98–108. (In Russ.).
4. Gayduk V.V. *Vilyuyskaya srednepaleozoyskaya riftovaya sistema* [Vilyuy Middle Paleozoic rift system]. Yakutsk, YB SB AS USSR Publ., 1988. 128 p. (In Russ.).
5. Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A., eds. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoy platformy* [Petroleum geology of the Siberian Platform]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 552 p. (In Russ.).
6. Parfenova T.M., Korovnikov I.V., Melenevskiy V.N., Eder V.G. [Geochemical prerequisites for the oil and gas prospects of Cambrian formations of Lena-Amga interfluvial area (southeast of Siberian Platform)]. *Geologiya nefti i gaza – Oil and Gas Geology*, 2009, no. 1, pp. 87–91. (In Russ.).
7. Grausman A.A., Arzhakov M.I., Tugi E.R. *Kak eto bylo. Otkrytie nefti i gaza v Yakutii* [As it was. Discovery of oil and gas reserves in Yakutia]. Novosibirsk, Sibtekhno- rezerv Publ., 2002, part 1, pp. 5–31. (In Russ.).
8. Zabaluev V.V. [In search of Yakutian gas]. *Otkrytiye nefti i gaza v Yakutii* [Discovery of oil and gas in Yakutia]. Novosibirsk, Sibtekhno- rezerv Publ., 2002, pp. 164–180. (In Russ.).
9. Kashirtsev V.A. *Organicheskaya geokhimiya naf- tidov vostoka Sibirskoy plattformy* [Organic geochemistry of naphthenes in the east of the Siberian Platform]. Yakutsk, YB SB RAS Publ., 2003, 160 p. (In Russ.).
10. Trofimuk A.A. *Lena-Vilyuyskaya neftegazo- nosnaya provintsia* [Lena-Vilyuy oil and gas province]. Moscow, Nedra Publ., 1969. 279 p. (In Russ.).
11. Surkov V.S. *Megakompleksy i glubinnaya struktura zemnoy kory neftegazonosnykh provintsii Sibirskoy platformy* [Megacomplexes and deep structure of the Earth's crust in oil and gas provinces of the Siberian Platform]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 149 p. (In Russ.).
12. Mitchem R.M. Jr., Vail P.R., Tompson S.Sh. [Sedimentary complex as the main unit in stratigraphic analysis]. *Seismicheskaya stratigrafiya* [Seismic stratigraphy]. Moscow, Mir Publ., 1982, vol. 1, pp. 108–126. (In Russ.).
13. Sitnikov V.S., Alekseev N.N., Pavlova K.A., et al. [Newest forecast and development updating of Vilyuis- kaya syncline petroleum objects]. *Neftegazovaya ge- ologiya. Teoriya i praktika – Petroleum Geology. Theoret- ical and applied studies*, 2017, vol. 12, no. 1. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/6/9_2017.pdf. (In Russ.).
14. Frolov S.V., Karnyushina E.E., Korobova N.I., et al. [Features of the structure, sedimentary complexes and hydrocarbon systems of the Lena-Vilyuy oil and gas basin]. *Georesursy*, 2019, vol. 21., no. 2, pp. 13–30. (In Russ.).
15. Sitnikov V.S., Prishchepa P.M., Kushmar I.A., Pogodaev A.V. [Petroleum potential prospect of the southern part of Vilyuy syncline]. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and protection of mineral resources*, 2014, no. 7, pp. 22–28. (In Russ.).
16. Protopopov Yu.Kh. *Tektonicheskiye komplek- sy chekhla Vilyuyskoy sineklizy. Avtoref. kand. dis.* [Tectonic complexes of the Vilyuy syncline cover. Author's abstract of PhD thesis]. Novosibirsk, 1989. 16 p. (In Russ.).
17. Sivtsev A.I. [Petroleum prospects of the north eastern slope of the Suntar uplift]. *Materialy IX Vseros- siyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the 9th All-Russian Research and Practical Confer- ence]. Yakutsk, 2019, pp. 260–263. (In Russ.).
18. Sivtsev A.I., Zueva I.N., Chalaya O.N. [Struc- ture map of the thicknesses and occurrence depths of the top of the Kuonamkskaya oil shale formation]. *Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy kon- ferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu IGAiBM SO RAN* [Materials of the 7th All-Russian Research and Practical Conference, devoted to the 60th anniversary of DPMGI SB RAS]. Yakutsk, 2017, pp. 233–237. (In Russ.).
19. Staroseltsev V.S. Identifying paleopits as promising tectonic elements for active oil and gas gen- eration. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 4, pp. 475–483.
20. Sukhov S.S., Shabanov Yu.A., Pegel T.V., et al. *Stratigrafiya neftegazonosnykh basseynov Sibiri. Kem- briy Sibirskoy platformy* [Stratigraphy of Oil and Gas Basins of Siberia. The Cambrian of the Siberian Platform]. Novosibirsk, IPGG SB RAS Publ., 2016. 497 p. (In Russ.).
21. *Tektonika, geodinamika i metallogeniya Res- publiki Sakha (Yakutiya)* [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). L.M.Parfenov, M.I.Kuzmina eds]. Moscow, MAIK “Nau- ka/Interperiodika”, 2001. 571 p. Available at: http://di- amond.yasn.ru/wp-content/Bibl/Tectonics_geodynam- ics_metallogeny_2001.pdf. (In Russ.).
22. Fradkin G.S., Boldyrev M.V., Gayduk V.V., et al. [Tectonic setting and nature of the Vilyuy syncline]. *Geologiya i geofizika*, 1984, no. 1, pp. 38–50. (In Russ.).

© И. А. Губин, 2020