

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КЛИНОФОРМНОГО КОМПЛЕКСА НЕОКОМА СЕВЕРНЫХ И АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

С.В. Ершов, Г.Ф. Букреева, В.О. Красавчиков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Продуктивный комплекс неокома в геологическом отношении представляет собой один из самых сложных объектов в мезозойском чехле Западной Сибири. Клиноформная структура продуктивных горизонтов, резкие изменения мощностей, большое многообразие фациальных обстановок (от прибрежно-морских и континентальных до глубоководных) затрудняют корреляцию песчаных пластов и глинистых пачек. Восточные клиноформы (клиноформы западного падения) представлены чередованием глинистых и песчаных горизонтов. Именно к ним приурочена основная доля запасов УВ неокомского комплекса Западно-Сибирской НГП. При прогнозировании новых нефтегазоносных зон, оценке их перспектив и ресурсов необходимы не только карты по отдельным зонам и площадям, но и региональные построения. Компьютерные технологии, в течение ряда лет применяющиеся для моделирования региональных резервуаров УВ юры, в силу специфики геологического строения неокома пригодны для этих целей не в полной мере.

В работе описаны алгоритмы и компьютерная технология моделирования сеток региональных карт для неокомских отложений Западной Сибири. Предлагаемая технология основана на адаптации алгоритмов, методов и технологии, используемых для моделирования резервуаров УВ юры с учетом новых моделей и алгоритмов, целиком связанных со спецификой строения клиноформного комплекса.

Произведена апробация подхода на примере построения серии региональных карт по основным резервуарам неокома северных и арктических областей Западной Сибири.

Построены структурные карты и карты изопакит для серий клиноформ, выделяемых в составе трех региональных резервуаров неокома (подсармановского, подпимского и подальмского).

Неоком, клиноформный комплекс, компьютерное моделирование, региональные карты, Западная Сибирь.

COMPUTER SIMULATION OF NEOCOMIAN CLINOFORM RESERVOIRS IN NORTHERN AND ARCTIC WEST SIBERIA

S.V. Ershov, G.F. Bukreeva, and V.O. Krasavchikov

Neocomian reservoirs in the Mesozoic sedimentary cover of West Siberia have a complex geological structure. Their wedge-like (clinoform) geometry, with abrupt thickness changes and facies diversity (continental, shoreface, and pelagic deposits), causes difficulty in correlation between drilling- and seismics-based sand formations and clay caps. East-wedging (west-dipping) clinoforms consisting of interbedded clay and sand have the greatest reservoir potential in the West Siberian basin. Prediction of new oil and gas plays and their reservoir potential assessment require regional reconstructions in addition to local contour maps of individual zones and fields. However, the simulation technology which has been applied for years to Jurassic regional reservoirs is not fully applicable to the Neocomian clinoform sequences. Therefore we have adapted it correspondingly and suggest new tools to make due regard for the clinoform reservoir structure. The new approach has been tested through computing several structure and thickness contour maps of clinoform sequences for three largest regional Neocomian reservoirs (sub-Sarman, sub-Pim, and sub-Alymka) in northern and arctic West Siberia.

Neocomian; clinoform sequence; computer simulation; regional map; West Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция, несмотря на ее высокую изученность, еще не исчерпала свои потенциальные возможности. Это относится и к ее основному неокомскому продуктивному комплексу. В геологическом отношении он представляет собой один из самых сложных объектов в мезозойском чехле Западной Сибири. Клиноформная структура продуктивных горизонтов, резкие изменения мощностей, большое многообразие фациальных обстановок (от прибрежно-морских и континентальных до глубоководных) затрудняют корреляцию песчаных пластов и глинистых пачек как по данным бурения, так и по данным сейсморазведки, что сказывается на достоверности построенных карт.

При прогнозировании новых нефтегазоносных зон, оценке их перспектив и ресурсов необходимы не только карты по отдельным зонам и площадям, но и региональные построения [Конторович А.Э. и др., 1972; Красавчиков и др., 1998а; Карогодин и др., 2000]. Это обусловлено тем обстоятельством, что главные факторы, контролирующие формирование и современное размещение залежей УВ, могут быть выявлены только на региональном уровне исследований [Конторович А.Э. и др., 1972].

Однако при этом для слабоизученных территорий возникают трудности, связанные с неполнотой фактических данных, которые должны служить исходным материалом для картографии. В таких случаях используется вся имеющаяся прямая и косвенная информация: данные сейсморазведки и бурения, стохастические зависимости между отметками структурных карт, сетки для других геологических поверхностей и прочее. Без привлечения современного математического аппарата и компьютерных технологий провести корректные построения на основе подобной разнородной информации вряд ли возможно.

Компьютерные технологии, применяемые для юрского комплекса [Пакет..., 1981; Волков, 1988; Беляев и др., 1998; Красавчиков и др., 1998а,б; Карташов, 1999; Левчук и др., 2000; Борисов и др., 2001; Красавчиков, 2002], в силу специфики геологического строения неокомских отложений пригодны не в полной мере. В первую очередь это вызвано наличием в неокомское время в области морской седиментации аккумулятивного склона, в пределах которого происходят резкие изменения мощностей осадков и структурного плана продуктивных горизонтов [Ершов и др., 2001]. В то же время в ИНГГ СО РАН построены сетки региональных карт, охватывающих полностью Западно-Сибирскую гемисинеклизу — по подошве осадочного чехла, подошве и кровле юры (баженовская свита и ее аналоги) и кровле сеномана [Конторович А.Э. и др., 2001; Конторович В.А. и др., 2001].

В работе описан опыт построения серии региональных карт по основным резервуарам неокома северных и арктических областей Западной Сибири на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных. С этой целью авторами адаптированы алгоритмы и компьютерные технологии, применяемые при моделировании юрских региональных резервуаров [Леус, 1998, 2005; Красавчиков, 2002, 2006], а для реконструкции склонов клиноформ в условиях их низкой изученности разработана отдельная технологическая цепочка.

Клиноформы неокома Западной Сибири в геологическом отношении представляют собой естественные резервуары УВ. Региональные глинистые пачки, залегающие в их основаниях, служат флюидоупорами для проницаемых комплексов нижележащих клиноформ [Мкртчян и др., 1986; Карогодин и др., 1996, 2000; Ершов, 2004; Брехунцов и др., 2006; Шпильман и др., 2007]. В процессе моделирования осуществлялось построение набора структурных карт и карт толщин серий клиноформ, выделяемых в составе трех крупных резервуаров неокома (подсармановского, подпимского и подалымского). Естественно, что это оказалось и достаточно серьезной апробацией примененных алгоритмов и программ. Первая серия включает в себя порядка десяти берриас-валанжинских клиноформ (рис. 1). В ее кровле залегают продуктивный пласт БС₈ и его возрастные аналоги, которые перекрываются сармановской региональной глинистой пачкой верхнего валанжина. Проницаемые комплексы этих клиноформ соответствуют проницаемому комплексу подсармановского регионального резервуара неокома. Вторая серия охватывает две

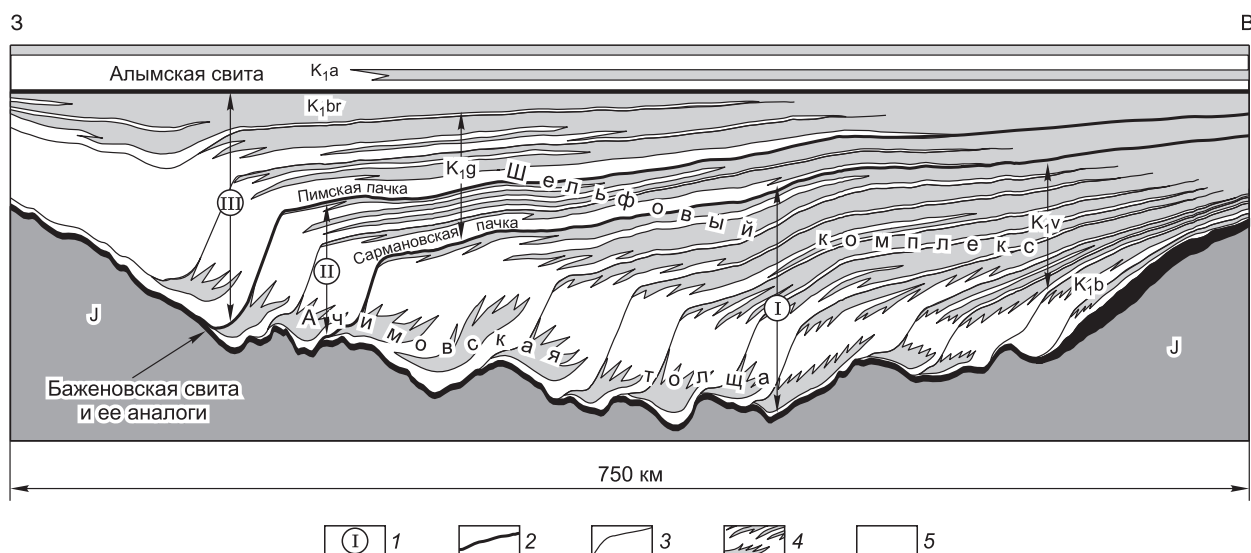


Рис. 1. Принципиальная модель геологического строения неокомского клиноформного комплекса.

I — серии клиноформ: *I* — подсармановская, *II* — подпимская, *III* — подалымская; 2 — границы серий клиноформ, 3 — границы субрегиональных клиноформ, 4 — песчано-алевритовые отложения, 5 — глинисто-алевритовые отложения.

клиноформы — сармановскую и уренгойскую, в разрезе которых выделяются продуктивные пласты БС_{1—7} нижнего готерива и их возрастные аналоги, соответствующие проницаемому комплексу подпимского резервуара. Флюидоупором для них является пимская региональная пачка. В состав третьей серии клиноформ входят пимская, приобская и быстринская клиноформы готерив-баррема с пластами группы АС, а точнее АС_{4—12} и их аналоги. Проницаемый комплекс этих клиноформ перекрывается на юге исследуемой территории аптскими глинами алымской свиты, а на остальной территории возрастными аналогами глинистых пачек в составе вартовской, тангаловской, ереямской, малохетской, таноппинской свит, некоторых других меловых свит соответствующего возраста и относится к подалымскому резервуару. Далее в тексте эти серии клиноформ (СК) условно назовем по названиям соответствующих им резервуаров — подсармановская, подпимская и подалымская.

ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Территория исследования охватывает северные и арктические районы Западно-Сибирской гемисинеклизы. В административном отношении это Ямало-Ненецкий АО, а также прилегающие районы Ханты-Мансийского АО и Красноярского края. В качестве фактического материала использовались, как отмечалось выше, данные сейсморазведки (десять региональных сейсмопрофилей), а также результаты ГИС более чем 1150 поисково-разведочных и параметрических скважин. Кроме того, в распоряжении авторов на изучаемую территорию имелись сетки с шагом 1 км для структурных карт по кровлям баженновской свиты и сеномана [Беляев и др., 1998; Красавчиков и др., 1998а; Конторович А.Э. и др., 2001].

В процессе работы уточнены структурные карты по кровле сеномана и кровле юры, построена еще серия карт, в том числе структурные карты по кровлям подсармановской, подпимской и подалымской СК, характеризующие меловой комплекс северных и арктических районов Западной Сибири.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общая схема

Первый этап работы включал в себя построение системы региональных корреляционных профилей, на которых были прослежены необходимые для картопостроения целевые стратиграфические уровни. К ним в первую очередь относятся: кровля баженновской свиты, ее аналогов — гольчихинской и яновстанской, выделяемых на востоке исследуемого района, а также кровля пласта ПК₁, которая соответствует кровле сеномана. Кроме того, прослежены кровли подсармановской, подпимской и подалымской СК. В первых двух случаях ими являются подошвы сармановской и пимской региональных глинистых пачек, в последнем — кровля неокомского клиноформного комплекса (подошва алымской свиты, см. рис. 1). Полученная система корреляционных профилей послужила основой для расчленения и корреляции остальных скважин. Затем по данным бурения и сейсморазведки определялись границы выклинивания серий клиноформ и линии бровок продуктивных пластов, залегающих в их кровле, в пределах которых происходят резкие изменения мощностей и структурного плана. Далее была подготовлена база отметок по целевым уровням.

На втором этапе по подготовленной информации строились структурные карты и карты изопакхит отложений. Для этого использована адаптированная и дополненная версия программно-алгоритмического комплекса [Леус, 1998, 2005; Красавчиков, 2002, 2006], разработанного в ИНГГ СО РАН и свыше десяти лет применяющегося при моделировании региональных и зональных резервуаров УВ юры Западной Сибири. Комплекс, предназначенный в основном для создания сеточных моделей рельефов, толщин и других параметров погруженных геологических поверхностей и тел на основе комплексной интерпретации данных сейсморазведки и бурения, прошел широкую апробацию [Красавчиков и др., 1998б; Карташов, 1999; Красавчиков и др., 1999; Левчук и др., 2000; Борисов и др., 2001; Конторович В.А. и др., 2001; Красавчиков, 2002; Шемин и др., 2002]. В частности, с его помощью была построена сетка (с шагом 1 км) структурной карты по кровле баженновской свиты для Западно-Сибирской плиты [Беляев и др., 1998; Красавчиков и др., 1998а]. В настоящей работе на ее основе для изучаемого региона создана новая сетка с уточненной по многим скважинам информацией. Имевшаяся на начало работ в распоряжении авторов сетка по кровле сеномана [Конторович А.Э. и др., 2001] также существенно уточнена по данным бурения.

Для неокомской толщи, за исключением аккумулятивных склонов клиноформ, структурные построения проводились в рамках линейной модели Гольдина—Волкова с учетом косвенной информации [Гольдин, 1971; Пакет..., 1981; Волков, 1988; Красавчиков, 2002; Леус, 2005]. В качестве таковой выступали сетки, построенные по регрессионным зависимостям абсолютных отметок моделируемых поверхностей (или их крупных фрагментов) от отметок по кровлям сеномана, баженновской свиты и координат X, Y:

$$u = av + bw + cX + dY + e, \quad (1)$$

т.е. в соответствии с моделью Гольдина—Волкова, но в ее расширенном толковании. Зависимости выявлены по данным бурения. Общая методология применения регрессионного анализа, в принципе, та же, что и при количественном прогнозе нефтегазоносности [Шпильман, 1982; Конторович А.Э. и др., 1988] и выявлении зависимостей между абсолютными отметками различных стратиграфических уровней [Конторович В.А., 2002], но она дополнена некоторыми функциями, существенными для картографических построений. Реализующая ее технология основывается на использовании программного продукта, полностью исключающего ручные построения, наподобие того, как это сделано у А.М. Волкова с соавторами [Пакет..., 1981; Волков, 1988] на основе *B*-сплайнов. Однако в программном комплексе ИНГГ СО РАН вместо *B*-сплайнов представлен другой интерполянт — потенциал-полиномы [Леус, 1998], существенно иная расчетная схема [Леус, 2005] и компьютерная технология [Красавчиков, 2002, 2006].

Для моделирования аккумулятивных склонов клиноформ вышеупомянутый математический аппарат и реализующее его программное обеспечение непригодны. Кроме того, склоны подсармановской и

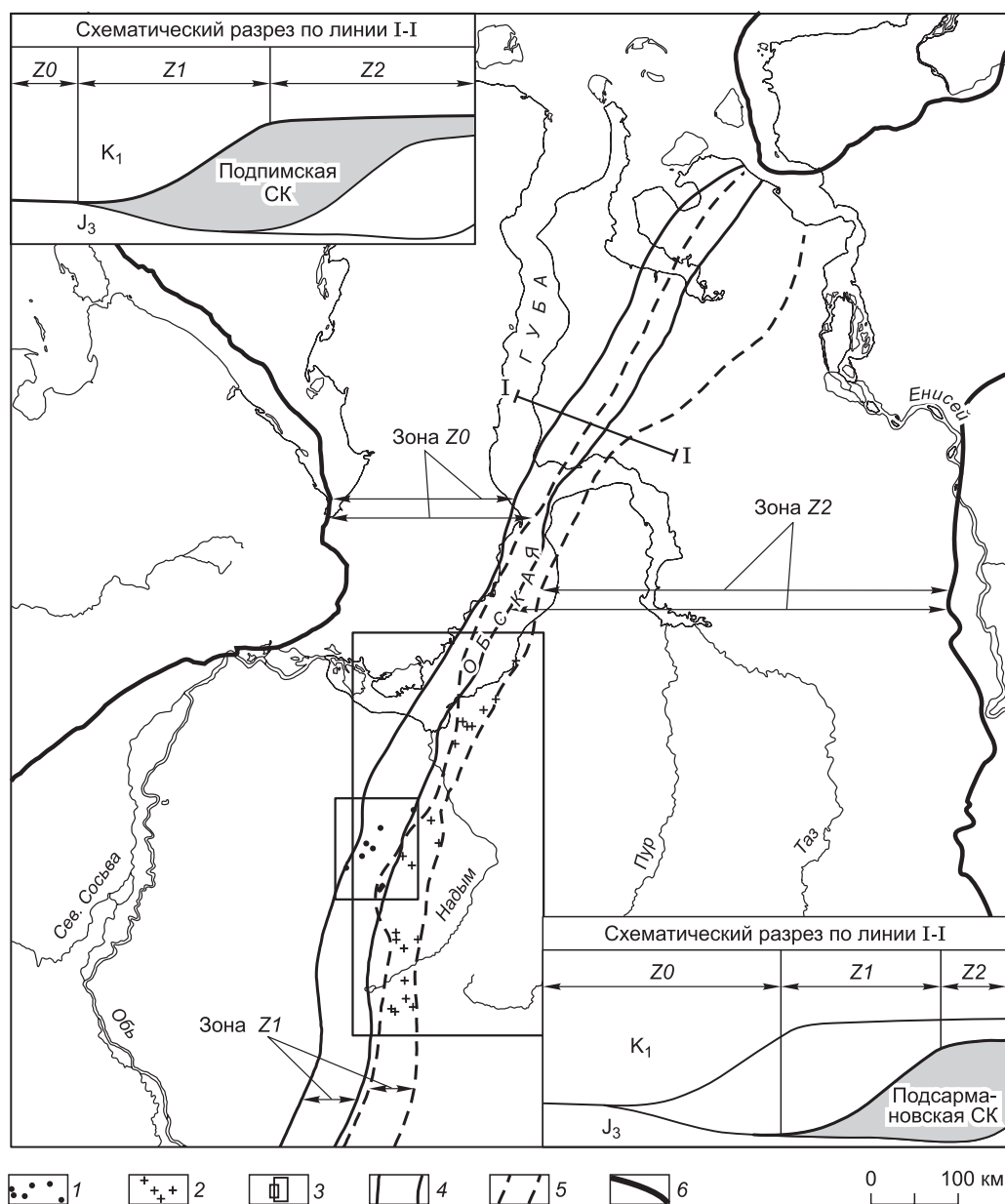


Рис. 2. Схема распространения зон Z0, Z1 и Z2 подпимской и подсармановской серий клиноформ.

I — скважины, вскрывшие склон подпимской СК, 2 — скважины, вскрывшие склон подсармановской СК, 3 — полигоны, оконтуривающие части склонов, разбуренных скважинами, 4 — границы склона подпимской СК, 5 — границы склона подсармановской СК, 6 — границы распространения неокомских отложений.

подпимской СК в пределах исследуемой территории — наименее изученные бурением части клиноформ. С учетом этих обстоятельств в настоящей работе для региональных построений предлагается использовать специально разработанную новую технологию (см. ниже), включающую на первом этапе для зон размещения скважин кусочно-линейный алгоритм моделирования толщин в зоне склона от кровли СК до кровли баженовской свиты. Этот алгоритм основан, в частности, на предположении о том, что в пределах склона толщина от кровли клиноформы до кровли баженовской свиты, как правило, возрастает в направлениях вдоль кратчайших линий между основанием и бровкой склона. Это же самое относится и к направлениям, близким к кратчайшим линиям. Конечно, кусочно-линейная модель — весьма грубое приближение и к тому же толщина, полученная таким способом, как правило, оказывается негладкой (в частности, на концах кратчайших линий и в скважинах, расположенных на линиях), поэтому построенную сетку толщин от кровли клиноформы до кровли баженовской свиты нередко приходится подвергать *управляемому сглаживанию* [Красавчиков, 2002, 2006] — процедуре, позволяющей для фиксированных зон варьирования получать гладкие сетки при заданных ограничениях на возможную вариацию значений в узлах сетки. При этом учитываются либо максимально допустимое отклонение ε от варьiruемой сетки, либо ограничения сверху и снизу для результирующей сетки, задаваемые также в виде сеток. Ограничения могут и не быть константами. Управляемое сглаживание осуществляется модифицированным методом минимальной кривизны (МММК) [Красавчиков, 2006], который представляет собой существенно видоизмененный метод Бриггса [Briggs, 1974].

С помощью МММК может производиться также *гладкое восполнение* (интерполяция) в пределах фиксированных зон варьирования. При этом учитываются граничные условия и фактические данные внутри зон варьирования. Кроме того, МММК позволяет осуществлять *гладкое сопряжение* (соединение) не вполне согласованных (по значениям в узлах и углам наклона) фрагментов сеток, в результате чего получается единая гладкая сетка, по которой невозможно определить границы перехода от фрагмента к фрагменту. *Управляемое сглаживание, гладкое восполнение и гладкое сопряжение* — различные постановки задач, решаемых МММК, и, соответственно, различные режимы работы программного обеспечения, реализующего МММК.

При моделировании подсармановской и подпимской СК сначала были выполнены построения по нижележащей подсармановской, а затем, с учетом созданных сеточных моделей, моделировалась подпимская СК. Их моделирование проводилось по единой схеме, излагаемой ниже. Экспертным путем территория подразделялась на три части (рис. 2):

зона *Z0* — западная часть, где серия клиноформ практически отсутствует (на структурной карте по кровле СК эта зона представлена кровлей поверхности, близкой к кровле баженовской свиты, на которую СК выклинивается);

зона *Z1* — склоновая зона СК;

зона *Z2* — восточная часть (наибольшая по площади, основная зона развития СК).

Структурные карты по кровле серии клиноформ для каждой из трех зон строились отдельно. Для *Z0* это фрагмент структурной карты, близкой к кровле баженовской свиты (от границы выклинивания СК до западной границы района исследования).

Поскольку для реализации построений по зоне *Z1* требуется информация по зонам *Z0* и *Z2*, опишем сначала, как осуществляются построения по зонам *Z0*, *Z2*.

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТОК СТРУКТУРНЫХ КАРТ В ЗОНАХ *Z0*, *Z2* ДЛЯ ПОДСАРМАНОВСКОЙ И ПОДПИМСКОЙ СЕРИЙ КЛИНОФОРМ

По зоне *Z0*, в которой отложения СК представлены маломощными конденсированными глинистыми осадками подачимовской толщи, построения исходили из постулата о субнулевой толщине СК в этой зоне.

Сетки структурных карт по кровлям СК в зоне *Z2* моделировались в два шага.

Шаг 1. Методом множественной линейной регрессии по базе данных бурения находились стохастические зависимости отметок кровли СК от отметок кровель баженовской свиты и сеномана с учетом плоскостного тренда (см. таблицу). Проводился анализ найденных зависимостей, а также численный эксперимент — построение карт с использованием в качестве косвенной информации сеток, полученных с помощью пересчета по найденным зависимостям. Как видно из таблицы, наилучшие коэффициенты множественной корреляции оказались при использовании абсолютных отметок кровель баженовской свиты, сеномана, а также координат X, Y . Однако авторами в качестве косвенной информации как для подсармановской, так и для подпимской СК выбраны сетки, построенные по линейным моделям, независимыми переменными которых являются только три параметра из четырех: отметка кровли баженовской свиты и координаты X и Y . При таком выборе коэффициенты корреляции несколько меньше, чем когда используются четыре параметра, но полученные рельефы, как оказалось, лучше соответствуют современным геологическим представлениям.

Коэффициенты корреляции (парной, множественной) между отметками кровли подпимской и подсармановской серий клиноформ в зоне Z2 и отметками кровель сеномана и баженовской свиты, координатами (плоскостного тренда)

Независимая переменная	Кровля			
	подпимской СК		подсармановской СК	
	Коэффициент корреляции	Число скважин	Коэффициент корреляции	Число скважин
Кровля сеномана	0.81	406	0.79	372
Кровля баженовской свиты	0.94	293	0.94	268
Кровли баженовской свиты и сеномана	0.95	273	0.94	250
Кровли баженовской свиты и сеномана, тренд моделируемой поверхности	0.98	273	0.98	250
Кровля баженовской свиты и тренд моделируемой поверхности	0.96	463	0.96	426

Шаг 2. Строилась окончательная версия сетки структурной карты в зоне Z2. В качестве «прямой» информации использовались, в частности, отметки моделируемой поверхности в зоне Z2 (для подпимской СК — данные по более чем 460 скважинам, для подсармановской — по более чем 420), а в качестве косвенной — сетки, полученные по выбранным регрессионным моделям. Создание сеток производилось с помощью метода и программного обеспечения, описанных в работе В.А. Леуса [2005].

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИН В ЗОНЕ АККУМУЛЯТИВНОГО СКЛОНА (ЗОНА Z1)

Как отмечалось выше, применять для моделирования аккумулятивных склонов клиноформ программное обеспечение, основанное на традиционной линейной модели Гольдина—Волкова (1), невозможно, так как абсолютные отметки кровли СК в зоне склона не коррелируют с абсолютными отметками кровель баженовской свиты и сеномана, а также с субпараллельными им региональными сейсмическими реперами (в частности, горизонтом M_1). Для того чтобы найти способ построения сетки структурной карты по кровле СК в зоне склона, были проведены численные эксперименты (картографические построения по различным технологическим цепочкам). Они показали, что в условиях низкой изученности склонов наиболее адекватные современным геологическим представлениям рельефы получались через моделирование толщин от *кровли СК до кровли баженовской свиты*, которое осуществлялось после завершения работ по зонам Z0 и Z2.

Модель толщин СК в зоне аккумулятивного склона в целом согласована со схемой формирования неокомского клиноформного комплекса, предложенной А.Л. Наумовым [1977]. Принималось, что клиноформы образовались при боковом заполнении глубоководного некомпенсированного палеобассейна и

1) как для подпимской, так и для подсармановской СК их толщина вдоль линий выклинивания СК (оснований склонов) близка к нулю (кровли СК прилегают к кровле баженовской свиты);

2) толщина отложений до баженовской свиты вдоль линии бровки аккумулятивного склона известна (она получается при моделировании зоны Z2);

3) толщина отложений между кровлей СК в зоне склона и кровлей баженовской свиты, как правило, возрастает вдоль кратчайших линий между основанием и бровкой склона, и в направлениях, близких к кратчайшим линиям;

4) если скважина пробурена в пределах аккумулятивного склона, то у нее толщина от кровли СК до баженовской свиты находится в интервале между аналогичными толщинами в точках основания и бровки (в кратчайшем сечении между основанием и бровкой склона).

Поскольку формирование шло по единой схеме, естественно предположить, что характер изменения толщин между кровлей СК и баженовской свитой от бровки аккумулятивного склона к его основанию, в общих чертах, определялся одними и теми же факторами — неважно, в южной, центральной или северной частях склоновой зоны Z1. Это неформальное заключение дополнено «более формализованным» предположением (3), поэтому мы предлагаем для тех частей склона, где не проводились буровые работы, использовать «поправочные коэффициенты» (см. ниже).

В отличие от модели Шлосса [Харбух и др., 1974; Мушин и др., 1990], предлагаемый в настоящей работе способ моделирования толщин СК в зоне склона не использует параметры, характеризующие геологические процессы и фациальные обстановки осадконакопления. Однако при низком уровне изученности моделируемых склонов СК бурением и сейсморазведкой, подобный подход на региональном уровне представляется более объективным, лишенным субъективных априорных предположений.

ОДНОМЕРНЫЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ МЕЖДУ КРОВЛЕЙ СК И БАЖЕНОВСКОЙ СВИТОЙ ДЛЯ СКЛОНОВОЙ ЗОНЫ ZI ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ, ИЗУЧЕННОЙ БУРЕНИЕМ

Этот алгоритм используется для генерации дополнительных точечных данных при построении первого приближения сеточной модели толщин в той части зоны ZI, где есть скважины.

Одномерную задачу аппроксимации толщин для вертикального фрагмента сечения от кровли СК в зоне склона до баженовской свиты рассмотрим в частном случае, когда известны значения этой толщины z_1, z_2 на концах отрезка $[0, \rho]$, $z_1 < z_2$ и выполняются предположения (1)–(3). Точки с известными значениями толщин — это, например, скважины, точки на бровках и основаниях. Левый конец отрезка расположен ниже, а правый — выше по склону. Толщину между кровлей СК и баженовской свитой для склоновой зоны СК на отрезке $[0, \rho]$ предлагается моделировать в виде выпуклой комбинации величин z_1, z_2 :

$$z(r) = (1 - r/\rho) \cdot z_1 + (r/\rho) \cdot z_2, \quad (2)$$

где $r \in [0, \rho]$. Очевидно, что $z_1 \leq z(r) \leq z_2$, $z(0) = z_1$, $z(\rho) = z_2$. Если хотя бы одно из значений z_1, z_2 замерено в скважине, то на всем сечении от основания до бровки клиноформы получаем кусочно-линейную кривую.

Пусть $z = z(x, y)$ — функция, определяющая значение толщины между кровлей СК и баженовской свитой в точке (x, y) ; $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ — точки, в которых известны значения этой толщины z_1, z_2 соответственно. Тогда, поделив отрезок между (x_1, y_1) и (x_2, y_2) на n равных частей, получим $(n + 1)$ точку, в которых значение толщины рассчитаем следующим образом:

$$z(r(i)) = (1 - r(i)/\rho)z_1 + (r(i)/\rho) \cdot z_2, \quad i = 1, \dots, n - 1, \quad (3)$$

где ρ — расстояние между (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , $r(0) = 0$, $r(n) = \rho$. Очевидно, что $z(r(0)) = z_1$, $z(r(n)) = z_2$.

ЗАВЕРШАЮЩИЕ ШАГИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИН СК В ЗОНЕ АККУМУЛЯТИВНОГО СКЛОНА ZI

С учетом вышеизложенного опишем схему и завершающие шаги моделирования толщины СК в зоне склона для нижележащей подсармановской СК. Здесь толщина от кровли СК до кровли баженовской свиты равна толщине СК. Расчет толщин склоновой зоны проводился в два шага: сначала для ограниченной территории, где есть данные бурения, а затем там, где таковые отсутствуют (см. рис. 2).

Шаг 1. Расчет толщин для территории, изученной бурением, осуществлялся в следующей последовательности.

— Через скважины проводились линии, параллельные оси абсцисс (горизонтали). Как правило, на линии была только одна скважина, так что линия подразделялась скважиной на два отрезка; каждому из которых соответствовала своя собственная одномерная линейная модель. Отрезки подразделялись на заданное число интервалов, одно и то же для всех отрезков. На концах интервалов (кроме бровки, линии выклинивания и скважин) по формуле (3) рассчитывались толщины СК в зоне склона.

— Модифицированным методом минимальной кривизны [Красавчиков, 2002, 2006] для той части склона, где есть данные бурения, по совокупности исходных и расчетных данных (включая данные бурения, граничные значения по бровке аккумулятивного склона и его основанию, расчетные значения для точек с отрезков линий, содержащих скважины), строилась равномерная сетка карты толщин склоновой зоны с шагом 1 км. В рассматриваемом случае ММК осуществлял гладкую интерполяцию. При этом верхнее и нижнее ограничения задавались таким образом, чтобы выполнялось условие (4).

Шаг 2. Расчет толщин для территорий, где данные бурения отсутствуют, осуществлялся следующим образом.

А. Для территории, изученной бурением, находились поправочные коэффициенты (см. п. 5 ниже), которые использовались при расчете толщин склоновой зоны СК на участках, где скважины отсутствуют. С этой целью предприняты следующие действия.

1. Карта толщин склоновой зоны покрывалась регулярной сетью линий. Одни из них ($L_1, L_2, \dots$) шли субпараллельно бровкам клиноформ, а другие ($G_1, G_2, \dots$) совпадали с горизонталями равномерной сетки, в узлах которой проводилось моделирование всех геологических поверхностей. При этом на фиксированной горизонтали G_j соседние линии L_{i-1}, L_i находились на равном расстоянии друг от друга.

Еще раз отметим, что в настоящем случае горизонтали почти всегда находятся приблизительно под одним и тем же острым углом к кратчайшим линиям на всей территории — как в районе сосредоточения скважин, так и там, где скважины отсутствуют (см. рис. 2). Если бы это было не так, то были бы выбраны не горизонтали, а кратчайшие линии.

2. По равномерной сетке построенной карты толщин в точках пересечения линий L_i с G_j (кроме скважин, оснований и бровок) программой снимались (в узлах сетки) либо рассчитывались (вне узлов) соответствующие значения.

3. Вычислялось среднее значение толщин h_{cp} , полученное по бровке склона, которое рассчитывалось по сетке карты толщин зоны $Z2$ и принималось за нормирующее значение; усреднение велось по точкам пересечения бровки с горизонталями.

4. Для каждой линии L_i (кроме оснований и бровок) вычислялось среднее значение толщины склоновой зоны (по снятым либо вычисленным значениям, см. п. 2 выше) $h_{cp}(i)$.

5. Для каждой L_i (кроме бровок и оснований) рассчитывались поправочные коэффициенты

$$k(i) = h_{cp}(i)/h_{cp},$$

которые использовались при моделировании толщин для тех участков склона, где отсутствовали данные бурения (см. п. Б ниже).

Б. Для той части территории, где отсутствуют скважины, склон покрывался сетью линий, продолжающих описанные выше линии L_i . Для каждой горизонтали G_j по сетке карты толщин зоны $Z2$ вычислялась толщина $h(j)$ на бровке склона. Затем в точках пересечения L_i с G_j вычислялись толщины склоновой зоны $h(i, j)$ по формуле

$$h(i, j) = k(i) \times h(j).$$

Далее, для участков склоновой зоны, расположенных к северу и югу от районов размещения скважин, строились сетки карт толщин между кровлей СК и кровлей баженовской свиты. При этом использовались величины $h(i, j)$ и граничные условия (толщина СК вдоль линии выклинивания и бровки склона, а также вдоль границ территорий, изученных бурением). Построения проводились с помощью МММК.

ПОСТРОЕНИЕ ОКОНЧАТЕЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ СЕТОК СТРУКТУРНЫХ КАРТ И КАРТ ИЗОПАХИТ ДЛЯ ПОДСАРМАНОВСКОЙ, ПОДПИМСКОЙ И ПОДАЛЫМСКОЙ СЕРИЙ КЛИНОФОРМ

После выполнения вышеописанных процедур тем же МММК для каждой из серий клиноформ осуществлялось гладкое сопряжение [Красавчиков, 2002, 2006] сеток толщин для трех фрагментов склона (где есть скважины, севернее и южнее), в результате чего создавалась единая сетка карты толщин зоны $Z1$. Сетка структурной карты по кровле СК в зоне склона строилась сложением сеток структурной карты по кровле нижележащей толщи и построенной карты толщин склоновой зоны. Затем она подвергалась управляемому сглаживанию [Красавчиков, 2002, 2006], т.е. сглаживанию с учетом заданных в виде сеток ограничений сверху и снизу либо максимально допустимого отклонения.

Общая структурная карта по кровле СК изготовлена путем гладкого сопряжения построенных поверхностей по трем зонам.

Окончательный вариант сетки толщин подпимской (как и подсармановской) СК получен вычитанием сеток кровли и подошвы и проходил контроль по данным бурения. В зонах $Z1$, $Z2$ подошвой подсармановской СК служит баженовская свита и ее возрастные аналоги. Поэтому сетка для карты изопакит подсармановской СК представляет собой разность сеток структурных карт по кровле подсармановской СК и кровле баженовской свиты.

После этого осуществлялись построения для подалымской СК. Поскольку ее кровля с учетом плоскостного тренда хорошо коррелируется с кровлями баженовской свиты и сеномана (коэффициент множественной корреляции R в этом случае равен 0.97), для отыскания зависимости для упомянутой кровли правомочно использовать формулу (1).

При нахождении зависимости вида (1) для кровли подалымской СК использованы данные бурения и координаты свыше 340 скважин. По выявленной зависимости рассчитывалась предварительная сетка. Окончательная сетка создавалась на основе комплексной интерпретации: 1) абсолютных отметок кровли подалымской СК для более чем 630 скважин («прямая» информация), 2) предварительной сетки, которая применялась в качестве косвенной информации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенной работы на исследуемую территорию построено три структурные карты и шесть карт изопакит, не считая уточненных карт по кровлям баженовской свиты и сеномана. Некоторые из них в качестве примера приведены на рис. 3—5. Использование (наряду с данными бурения и сейсморазведки) косвенной информации, которой являются сетки по кровлям баженовской свиты и сеномана, позволило построить относительно детальные карты, которые охватывают также территории, слабо изученные бурением. К таковым можно отнести периферийные районы Западно-Сибирской гемисинеклизы, внутренние районы п-ова Гыдан, акваторию Карского моря и некоторые другие районы.

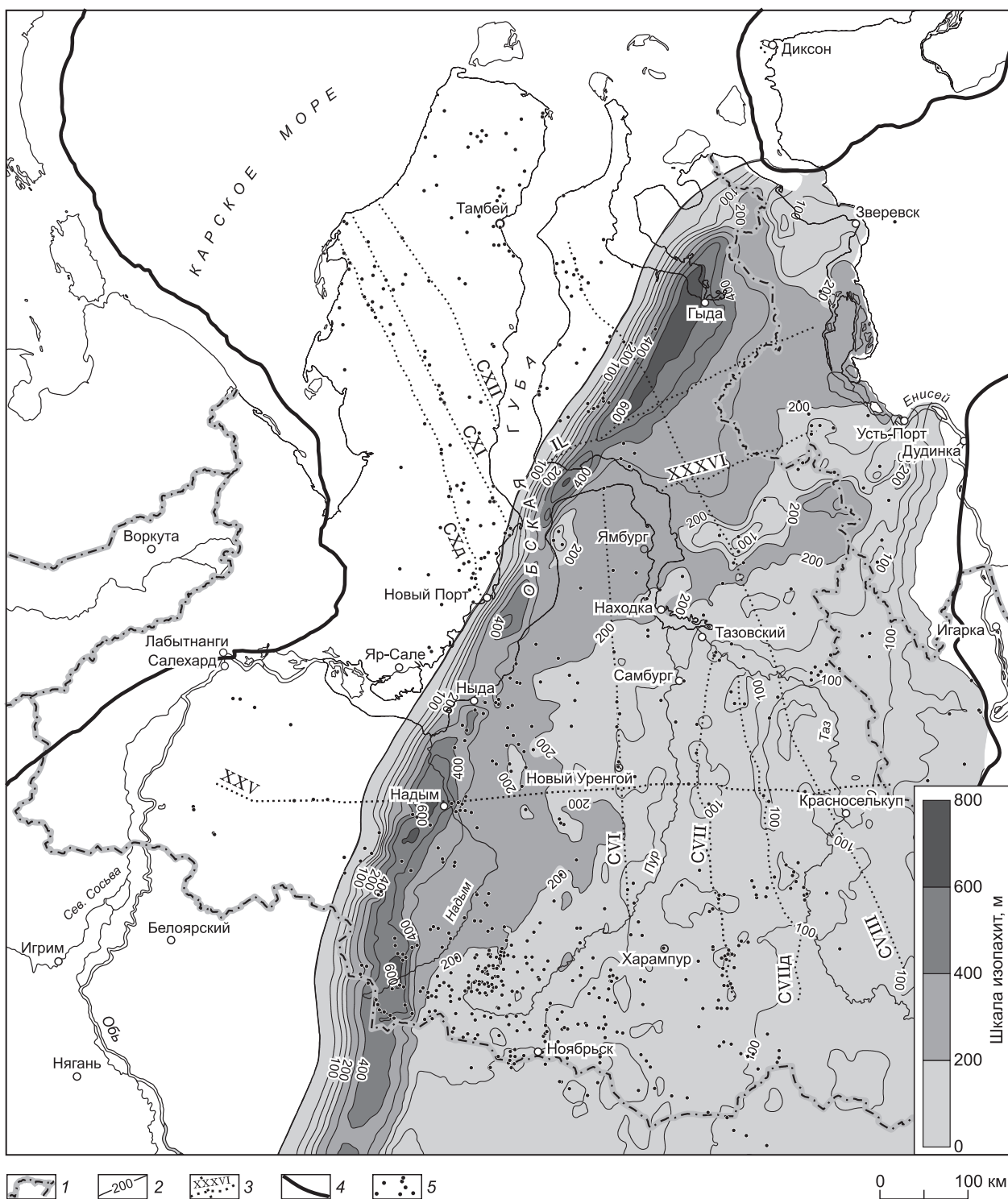


Рис. 3. Карта изопакит подпимской серии клиноформ северных и арктических районов Западной Сибири.

1 — административные границы, 2 — изопакиты (изогипсы на рис. 4), 3 — линии региональных сейсмических профилей, 4 — граница распространения неокомских отложений, 5 — поисково-разведочные и параметрические скважины.

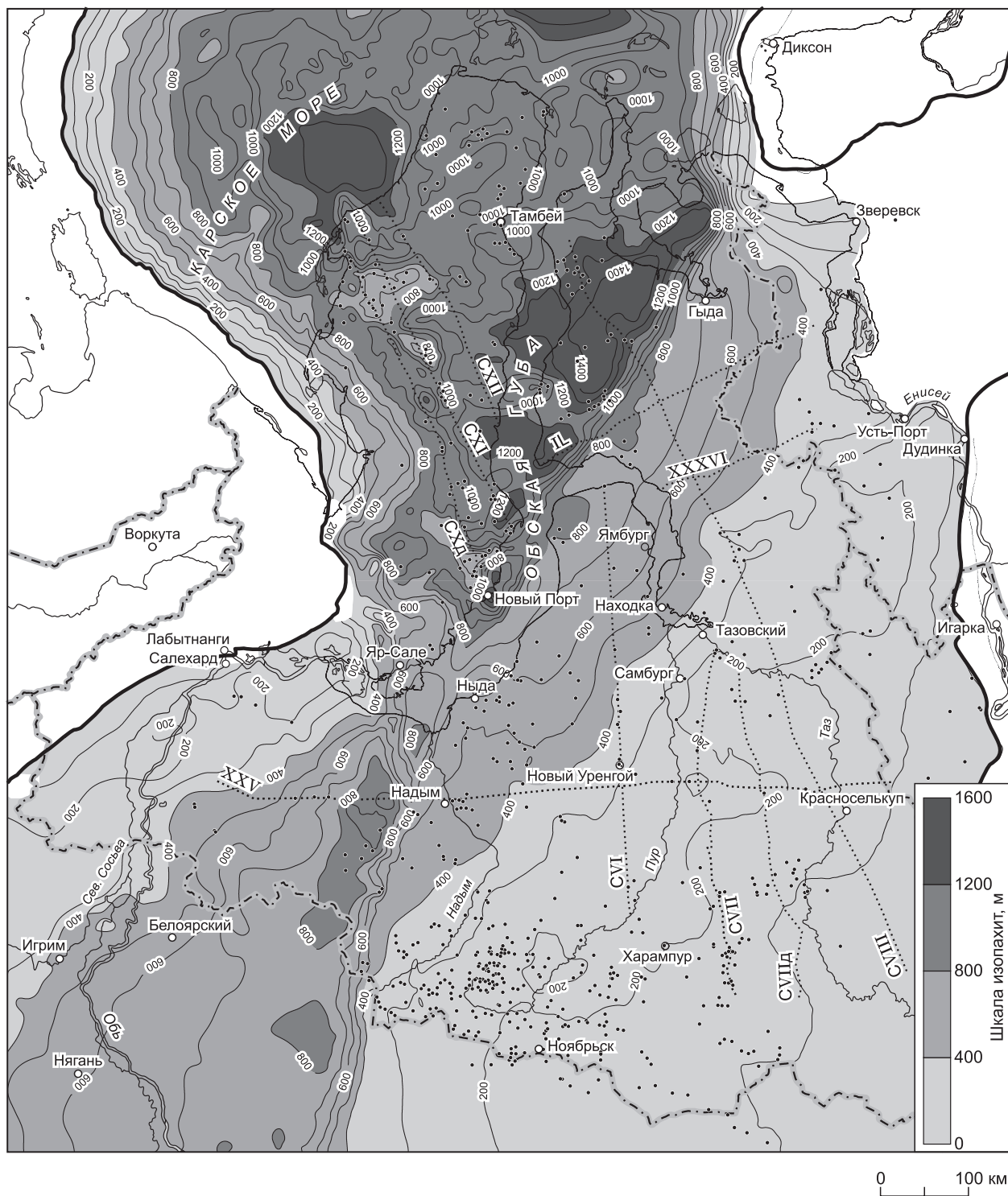


Рис. 5. Карта изопакит подалымской серии клиноформ северных и арктических районов Западной Сибири.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

Ввиду особенностей геологического строения клиноформного комплекса, карты толщин, построенные авторами по сериям клиноформ, заметно отличаются от карт толщин, построенных по осадочным комплексам, имеющим горизонтально-слоистое строение. На картах изопахит отчетливо выделяются ундаформа и субклиноформная зона повышенных мощностей, вытянутая в субмеридиональном направлении. В случае с подпимской СК мощности в депоцентрах этой зоны (см. рис. 3), ширина которой составляет 70—100 км, достигают 600 м, в то время как в пределах ундаформы они увеличиваются с востока на запад от 0 до 200—300 м.

Согласно схеме формирования неокомского клиноформного комплекса, предложенной Наумовым А.Л. [1977] и развитой впоследствии в работах Карогодина Ю.Н., Мкртчяна О.М., Нежданова А.А. [Мкртчян и др., 1985, 1986; Нежданов, 1988; Нежданов и др., 1992; Карогодин и др., 1996; 2000] и многих других исследователей, клиноформы образовались при боковом заполнении глубоководного некомпенсированного палеобассейна. В направлении к его центральной части они переходят в маломощные конденсированные глинистые осадки подачимовской толщи. На сейсмических профилях это отражается в виде прилегания границ клиноформ к кровле баженовской свиты. При картировании в центральных частях палеобассейна за зону отсутствия клиноформы (в данном случае серии клиноформ) условно принимается область, в которой по сейсмическим данным или данным ГИС ее не представляется возможным выделить и проследить ввиду малой мощности, которая может составлять первые метры или даже сантиметры.

На структурной карте по кровле подпимской СК (см. рис. 4) показана область ее распространения, ограниченная с запада границей прилегания ее кровли к баженовской свите, а с востока — выклиниванием отложений этой серии на бортах Западно-Сибирской плиты. На значительной части территории (в области ундаформы) эта поверхность с точностью до плоскостного тренда залегает субпараллельно кровлям баженовской свиты и сеномана, которые и использовались в качестве косвенной информации при ее моделировании. Большинство структур I, II и III порядков, не говоря уже об надпорядковых тектонических элементах, которые фиксируются на этом уровне, выделяются на исходных структурных картах по кровлям юрского и сеноманского структурных ярусов. Отметим, что параллельно западной границе серии клиноформ выделяется полоса шириной 30—70 км, которая соответствует склоновой зоне серии. В ее пределах кровля подпимской СК залегает под углом к вышеуказанным поверхностям. Вдоль западной границы выклинивания серии абсолютные отметки ее кровли будут практически совпадать с отметками кровли баженовской свиты.

Карты изопахит с некоторыми оговорками всегда использовали в палеотектоническом анализе при выявлении условий формирования отложений. В этой связи особый интерес представляет карта изопахит подальмской СК (см. рис. 5). Эта серия из трех субрегиональных клиноформ завершает этап формирования неокомского продуктивного комплекса (см. рис. 1). Даже без учета уплотнения пород карта условно отражает рельеф дна палеобассейна в готеривское время на момент формирования пимской пачки. Высокими градиентами изопахит отчетливо фиксируется положение аккумулятивного склона, протянувшегося в субмеридиональном направлении. Его высота составляет от 300—400 м на юге до 500—600 м на севере исследуемой территории. Как видно из построенной карты, он делил морской палеобассейн на две области — мелководного шельфа (на востоке) с низкими градиентами изменения мощностей, пологими формами рельефа и глубоководного шельфа (на западе), который к середине готерива уже имел относительно расчлененный рельеф дна. Последнее вполне логично объясняется тем, что в течение примерно 15 млн лет (с берриаса до середины готерива) данная территория являлась областью некомпенсированного осадконакопления. Тектонические движения дна бассейна на фоне незначительной скорости седиментации, которая составляла примерно 2—10 м/млн лет, привели к появлению в рельефе положительных и отрицательных структур амплитудами до 200 м. Данная карта (см. рис. 5) фиксирует, что в пимское время (ранний готерив) ранее единое глубоководное баженовское море Западной Сибири в районе южной части современной акватории Обской губы оказалось разделенным на две глубоководные зоны, которые соединялись между собой мелководным проливом. При этом северная зона была более глубоководной. Седиментация в этих частях бассейна вплоть до апта имела свои отличительные особенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением адаптированного и дополненного программно-алгоритмического комплекса, ранее применявшегося для моделирования юрских региональных резервуаров, удалось промоделировать геологическое строение клиноформного комплекса северных и арктических районов Западно-Сибирской плиты. Для склонов клиноформ, слабоизученных бурением, разработана специальная процедура, при которой сначала моделируется толщина от кровли СК до кровли баженовской свиты (по граничным условиям и данным бурения), а затем — их остальные характеристики.

Построены карты повышенной детальности для подсармановской, подпимской и подальмской серий клиноформ. Детальность достигнута главным образом за счет использования косвенной информации — структурных карт по кровлям баженовской свиты и сеномана.

Описанные в настоящей статье математический аппарат и компьютерные технологии можно применять при моделировании клиноформного комплекса неокомских отложений Западной Сибири не только на уровне крупных седиментационных комплексов (в данном случае серий клиноформ), но и непосредственно на уровне региональных, субрегиональных и, в некоторых случаях, зональных клиноформ.

Проведенные построения использовались при оценке ресурсов УВ резервуаров неокомского продуктивного комплекса северных и арктических областей Западной Сибири.

ЛИТЕРАТУРА

Беляев С.Ю., Букреева Г.Ф., Деев Е.В., Зиновьев С.В., Красавчиков В.О., Лапин П.С., Леус В.А., Новикова С.Н. Новые структурные и морфоструктурные карты осадочного чехла северной части Западно-Сибирской плиты // Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа. М., 1998, с. 24—27.

Борисов Е.В., Елишева О.В., Истомина А.В. Закономерности распространения и нефтегазоносность верхне- и среднеюрского резервуаров на территории Омской области // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений, 2001, № 10, с. 30—35.

Брехунцов А.М., Бородин В.Н., Дещеня Н.П., Нестеров И.И. (мл.), Храмова А.В., Цимбалюк Ю.А., Корнев В.А. Геолого-геофизические предпосылки создания региональной геологической модели неокомского комплекса Западной Сибири как основы для уточнения его углеводородного потенциала // Горные ведомости, 2006, № 3, с. 10—27.

Волков А.М. Геологическое картирование нефтегазоносных территорий с помощью ЭВМ. М., Недра, 1988, 221 с.

Гольдин С.В. Линейные модели при анализе структурных взаимоотношений // Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 45. Тюмень, Изд-во ЗапСибНИГНИ, 1971, с. 104—124.

Ершов С.В. Закономерности вертикального и латерального размещения залежей нефти в неокомских клиноформах Северного Приобья Западной Сибири // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, 2004, № 10, с. 12—19.

Ершов С.В., Зверев К.В., Казаненков В.А., Карогодин Ю.Н. Седиментация в раннемеловом бассейне Западной Сибири и ее влияние на нефтегазоносность // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (11—12), с. 1908—1917.

Карогодин Ю.Н., Ершов С.В., Сафонов В.С., Ефремов И.Ф., Манугян П., Овердал Ф., Вала-сек Д., Потапов А.М., Конышев А.И., Кузнецов В.И., Разяпов Р.К. Приобская нефтеносная зона Западной Сибири: системно-литмологический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1996, 252 с.

Карогодин Ю.Н., Казаненков В.А., Рыльков С.А., Ершов С.В. Северное Приобье Западной Сибири. Геология и нефтегазоносность неоккома (системно-литмологический подход). Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000, 200 с.

Карташов А.А. Особенности геологического строения верхнемалышевского резервуара на северном погружении Сургутского свода // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (2), с. 201—212.

Конторович А.Э., Трофимук А.А., Фотиади Э.Э. Главные факторы формирования и современного размещения залежей нефти и газа // Закономерности размещения и условия формирования залежей нефти и газа в мезозойских отложениях Западно-Сибирской низменности. М., Недра, 1972, с. 279—285. (Тр. СНИИГГИМС, вып. 131).

Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Гуревич Г.С., Демин В.И., Лившиц В.Р., Моделевский М.С., Страхов И.А., Вымятин А.А., Растегин А.А. Количественная оценка перспектив нефтегазоносности слабоизученных регионов. М., Недра, 1988, 223 с.

Конторович А.Э., Конторович В.А., Беляев С.Ю., Красавчиков В.О., Агалаков С.Е. Тектоника осадочного чехла Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Материалы совещания «Тектоника неогей: общие и региональные аспекты», т. 1. М., Геос, 2001, с. 307—310.

Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002, 253 с.

Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (11—12), с. 1832—1845.

Красавчиков В.О. Комплексная интерпретация слабо согласованных геолого-геофизических данных при построении региональных структурных карт (на примере осадочного чехла Западно-Сибирской плиты) // Геология и геофизика, 2002, т. 43 (5), с. 454—467.

Красавчиков В.О. Модифицированный метод минимальной кривизны в компьютерном моделировании региональных и зональных геологических тел и полей при изучении нефтегазоносных бассей-

нов // Тез. докл. науч.-практ. Южно-Российской конф. «Проблемы бассейнового и геолого-гидродинамического моделирования». Волгоград, 2006, с. 31—32.

Красавчиков В.О., Беляев С.Ю., Букреева Г.Ф., Деев Е.В., Зиновьев С.В., Панин П.С., Леус В.А., Новикова С.Н. Региональные структурные карты повышенной детальности по опорным отражающим горизонтам чехла северных и центральных районов Западно-Сибирской плиты // Актуальные вопросы геологии и географии Сибири. Т. 2. Геология нефти и газа (матер. научн. конф. Томского гос. университета 1—4 апреля 1998 г.). Томск, Изд-во Том. ун-та, 1998а, с. 80—82.

Красавчиков В.О., Букреева Г.Ф., Санин В.Я., Саенко Л.С. Геологическая модель флюидодинамической связи палеозойских и нижнесреднеюрских резервуаров нефти и газа в Западно-Сибирском бассейне // Геология и геофизика, 1998б, т. 39 (3), с. 307—315.

Красавчиков В.О., Конторович В.А., Букреева Г.Ф., Карташов А.А., Золотова О.В., Саенко Л.С. Зоны потенциальной аккумуляции УВ в отложениях горизонта Ю₂ Западной Сибири (на примере Усть-Тымской мегавпадины и ее обрамления) // Геология нефти и газа, 1999, № 7—8, с. 25—36.

Левчук М.А., Топешко В.А., Букреева Г.Ф., Каменецкая С.М., Красавчиков В.О., Сазоненко Д.Ф., Дьяконов В.А., Семянов А.А. Модель геологического строения отложений пласта Ю₁ Аганско-Мегионской зоны нефтенакопления // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Тюмень, 2000, с. 49—56.

Леус В.А. Решение задач геологической компьютерной картографии на основе потенциал-полиномов // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (10), с. 1423—1430.

Леус В.А. Интерполяционный метод учета косвенной информации при построении карт геологических поверхностей // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (2), с. 223—234.

Мкртчян О.М., Белкин Н.М., Дегтев В.А. Сейсмогеологическое обоснование единой схемы корреляции продуктивных пластов неокома Среднего Приобья // Сов. геология, 1985, № 11, с. 115—122.

Мкртчян О.М., Орел В.Е., Филина С.И., Пуркина Э.М. Особенности строения и нефтегазоносности неокомского комплекса Западной Сибири // Геология нефти и газа, 1986, № 11, с. 1—7.

Мушин И.А., Бродов Л.Ю., Козлов Е.А., Хатянов Ф.И. Структурно-формационная интерпретация сейсмических данных. М., Недра, 1990, 299 с.

Наумов А.Л. К методике реконструкции рельефа дна Западно-Сибирского раннемелового бассейна // Геология и геофизика, 1977 (10), с. 38—47.

Нежданов А.А. Основные закономерности строения сейсмостратиграфических комплексов неокома Западной Сибири // Геофизические методы при обосновании объектов нефтепоисковых работ в центральных районах Западной Сибири. Тюмень, ЗапСибНИГНИ, 1988, с. 62—70.

Нежданов А.А., Огибенин В.В., Бабурин А.Н., Соколов В.И. Сейсмогеологический прогноз и картирование неантиклинальных ловушек нефти и газа в Западной Сибири. М., МГП «Геоинформмарк», 1992, ч. 1, 99 с.; ч. 2, 101 с.

Пакет программ решения задач геологии нефти и газа / Ред. А.М. Волков. Тюмень, Изд-во ЗапСибНИГНИ, 1981, 115 с. (Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 161).

Харбух Дж., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М., Мир, 1974, 319 с.

Шемин Г.Г., Нехаев А.Ю., Красавчиков В.О., Рябкова Л.В., Фомин А.Н., Бейзель А.Л., Букреева Г.Ф., Вакуленко Л.Г., Зиновьев С.В., Косяков Д.В., Лапин П.С., Брехунцов А.М., Бочкарев В.С., Дещеня Н.П., Урасинов Б.Л. Критерии и результаты оценки перспектив нефтегазоносности нижней юры Надым-Тазовского междуречья Западно-Сибирской НГП // Геология и геофизика, 2002, т. 43 (12), с. 1107—1123.

Шпильман А.В., Мясникова Г.П., Солопахина Л.А., Захарова Л.М., Олейник Е.В., Рыбькова Е.В., Рубина Т.В. Геологическое строение и нефтегазоносность неокомского комплекса территории ХМАО—Югры Западной Сибири // Пути реализации нефтегазового и рудного потенциала Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. Т. 1 (Десятая научно-практическая конференция) / Под ред. В.И. Карасева, А.В. Шпильмана, В.А. Волкова. Ханты-Мансийск, 2007, с. 164—179.

Шпильман В.И. Количественный прогноз нефтегазоносности. М., Недра, 1982, 215 с.

Briggs I.C. Machine contouring using minimum curvature // Geophysics, 1974, v. 39, № 1, p. 39—48.