

РОЛЬ СЕКВЕНСНОЙ СТРАТИГРАФИИ В РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ ПАЛЕОГЕОГРАФИИ

Рассмотрена возможность применения секвенсно-стратиграфического анализа для осадочных бассейнов активных и пассивных океанических окраин и континентальных осадочных бассейнов. Разработанная ранее методика выделения секвенций была реализована на примере Каспийского мегабассейна. Построена количественная кривая эвстатических колебаний уровня моря в позднекайнозойское время. Анализ этой кривой показывает, что в пределах Каспийского мегабассейна выделяются два крупных цикла относительного изменения уровня моря – акчагыльский и апшеронский, с общей тенденцией к его повышению. Сделана попытка выявления роли эвстатики и тектоники в формировании секвенций.

M.P. Antipov, E.E. Bobylova, I.E. Varchavskaia

THE ROLE OF SEQUENCE STRATIGRAPHY IN SOLVING PALEOGEOGRAPHICAL PROBLEMS

The possibility of applying the sequence-stratigraphical analysis to sedimentary basins of both continents and active/passive oceanic margins is discussed. The sequence recognition method, developed earlier, has been applied to the Caspian basin. The quantitative relationship has been obtained for late Cenozoic sea level variations. The analysis of this relationship has revealed the two stages, Akchagylian and Apsheronian, of relative sea level variation within the Caspian basin, with the general tendency to upper sea level. An attempt has been made to reveal the roles of eustatics and tectonics in the sequences formation.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие секвенсно-стратиграфические исследования широко обсуждаются в мировой геологической практике. Они берут свое начало в сеймостратиграфическом анализе, который активно используется при изучении осадочных бассейнов для реконструкции условий седиментации и построения седиментационных и палеогеографических моделей осадочных бассейнов. Заметный вклад в развитие принципов и приемов сеймостратиграфического анализа в 60–70-х годах прошлого столетия внесли американские геологи-нефтяники группы EXXON. В России прогрессу этого анализа способствовали работы как геофизиков [Гогоненков и др., 1984; Кунин, 1988], так и геологов [Волож и др., 1994; Гладенков и др., 1984; Карагодин, Арментроут, 1996; Шлезингер, 1998]. При изучении геологических объектов с использованием сеймостратиграфического анализа выявляется несколько аспектов его применения (литологический, стратиграфический и тектонический). Стратиграфическим аспектам сеймостратиграфии В.В. Меннер уделял особое внимание, регулярно подчеркивая в своих пуб-

личных выступлениях огромное значение сейсмостратиграфических исследований для палеогеографических реконструкций. В представленной работе мы затрагиваем только несколько проблемных вопросов сейсмостратиграфии и, в частности, секвенной стратиграфии – методики построения кривых относительного изменения уровня моря, реконструкции тектонических движений в пределах осадочных бассейнов и выявления роли тектонического и эвстатического факторов для создания слоистой структуры осадочных толщ.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Стратиграфическое, сейсмостратиграфическое, седиментологическое или циклическое расчленение осадочного разреза основано на данных разных дисциплин и приемах исследования – палеонтологии, литолого-фациального анализа, сейсморазведки, каротажных диаграмм и др. К настоящему времени существует множество далеко не всегда согласованных между собой терминов, понятий и принципов систематизации, пришедших из разных областей науки и обсуждающих зачастую одни и те же предметы. Одни и те же явления иногда описываются разными терминами и, наоборот, – разным геологическим процессам даются одинаковые названия. Появление в последнее время секвенной стратиграфии (на базе прежде всего сейсмостратиграфии и циклостратиграфии) позволило расшифровать геологические события с новых позиций. Секвенная стратиграфия, на наш взгляд, призвана объединить, упорядочить существующую систему взглядов и представлений введением нового реального геологического объекта – секвенции. В отечественной и зарубежной геологической литературе этот термин широко применяется при седиментологических построениях и сейсмостратиграфических исследованиях. Недавно Ю.А. Волож предложил называть определенную часть секвенций вейлитом [Пути..., 2001, с. 269]. Мы, вслед за автором этого термина, под «вейлитом» понимаем элементарную целостную осадочную систему, генетически связанную циклическостью относительных колебаний уровня моря (базиса эрозии осадочного бассейна). Она формируется в течение интервала времени, необходимого для восстановления профиля эрозионно-денудационного равновесия, нарушенного тектоническими либо эвстатическими процессами. Вейлиты как осадочные системы ограничены перерывами в осадконакоплении, выраженными поверхностями эрозионных несогласий, и коррелянтными им согласными границами. В краевой части бассейна эти поверхности несогласий отвечают перерывам, связанным с эрозией и размывом подстилающих толщ, а в центральных частях – с недостатком материала (отсутствием седиментации).

С точки зрения осадочной летописи, история развития осадочных бассейнов – это эволюция изменения уровня эрозионно-седиментационного равновесия, запечатленная в строении и вещественном составе осадочного чехла. Положение этого уровня определяется тремя основными факторами – тектоникой, эвстазией и климатом, каждый из которых может выступать в роли относительно независимой переменной. На особенности строе-

ния и вещественного состава осадочного чехла в конкретном районе, кроме тектоники, эвстазии и климата, также влияют объем сносимого обломочного вещества и расположение источников сноса. Проявляясь с разной степенью интенсивности и в разных сочетаниях друг с другом, эти факторы приводят к формированию по-своему неповторимых черт каждого индивидуального осадочного бассейна. Одним из результатов сочетания всех трех факторов на разрезах является перемещение бровки шельфа. Авторы данной статьи исходят в своих дальнейших построениях именно из предположения, что данные по перемещению бровки шельфа могут служить показателем изменения уровня моря. В то же время, несмотря на уникальность отдельного природного объекта, существуют общие закономерности формирования толщ в зависимости от колебаний уровня равновесия осадочных систем. Причиной этого являются цикличность процесса и соответствующее ей определенное строение результирующих осадочных тел.

Цикличность – это неотъемлемое свойство геологических, тектонических и седиментационных процессов. Вопросами цикличности в геологической науке занимались и занимаются многие исследователи. За последнее время опубликовано большое число статей и монографий, в которых проведен обзор истории изучения геологических циклов как глобальных, так и региональных. Выявление закономерностей в истории осадочных бассейнов, моделирование геологических процессов, реконструкция строения осадочных бассейнов всегда тесно переплетаются с циклическим анализом. Циклический анализ стал широко применяемым методом при изучении геологических процессов и явлений.

Под осадочным циклом понимается законченный круг явлений и процессов, которые приводят в течение того или иного отрезка времени к мобилизации и отложению вещественного материала в виде слоев или монослоев [Фролов, 1998]. Обычно цикл природных явлений приводит к формированию геологического тела – циклита. Циклит – это парагенез слоев, связанных более тесно друг с другом, чем со смежным парагенезом – циклитом того же ранга, от которого отделен более резкими границами. В зависимости от преобладающего фактора могут быть выделены тектоноциклиты, климатоциклиты, литоциклиты и др.

Тектоноциклиты выделяются в разрезе осадочного чехла в соответствии с общим ходом тектонического развития осадочного бассейна и отвечают обычно крупным интервалам геологического времени (геотектоническим циклам, фазам складчатости Штилле) [Хаин, 2003], формируя структурно-тектонические этажи, ярусы и квазисинхронные сейсмостратиграфические комплексы [Кунин, Кучерук, 1984].

Климатоциклиты формируются за счет преобладающего в осадконакоплении климатического фактора, а одним из типичных примеров таких циклитов являются ленточные глины, накопившиеся в результате сезонных колебаний климата.

Данные сейсмо- и секвенсно-стратиграфического анализа были сразу же востребованы многими разделами геологии – геотектоникой, стратиграфией, седиментологией и др. Так, в геотектонике они способствовали детализа-

ции представлений о строении структурных подразделений осадочного чехла, совершенствованию технологий моделирования процессов формирования и развития структур земной коры и осадочных бассейнов. В стратиграфии они широко используются для создания региональных и детальных местных стратиграфических шкал, для проведения глобальной стратиграфической корреляции осадочных разрезов, сопоставления результатов био-стратиграфических, магнитостратиграфических и радиоизотопных исследований в пределах отдельных осадочных бассейнов.

Нам представляется, что секвенная стратиграфия вносит новый аспект в стратиграфию, акцентируя внимание на изучении нового объекта исследования – секвенции. Развитие секвенной стратиграфии, безусловно, связано с ритмостратиграфией (циклостратиграфией), которая сейчас все чаще опирается на сейсмостратиграфический анализ.

Геологические тела, связанные в своем образовании с цикличностью седиментационных процессов, выделялись в геологии давно [Sloss, 1963; Вас-соевич, 1975; Карогодин, 1980; Фролов, 1998; и др.]. Наиболее близко к современному пониманию секвенно-стратиграфического анализа подошли В.И. Попов [1979] и В.А. Бабадаглы с соавторами [1975]. В своих исследованиях по этим проблемам они использовали ритмостратиграфический подход как основу стратиграфического расчленения формаций. В результате фациально-циклического (фациально-ритмического) анализа геологический разрез разделяется на ритмосерии, ритмопачки, ритмогоризонты и т.д. В.И. Поповым впервые было подчеркнуто преимущество ритмостратиграфических подразделений по сравнению с литологическими, так как в первом случае вводится понятие изохронности границ. Именно то, что естественные полифациальные геологические тела ограничены изохронными поверхностями, и позволяет рассматривать их в качестве главных подразделений чехла осадочных бассейнов. В то же время, предложенный В.И. Поповым подход к изучению осадочных бассейнов не получил должного развития, так как воспроизводимость результатов расчленения осадочного чехла оказывалась очень низкой, хотя в ряде хорошо изученных регионов Восточно-Европейской платформы и Туранской плиты были разработаны стратиграфические модели осадочных бассейнов, востребованные не только в прошлом, но и сейчас. Данное (циклостратиграфическое) направление исследований активно развивается Ю.Н. Карогодиным [Карогодин и др., 2000], который для выделения циклических подразделений предложил учитывать трансгрессивно-регрессивные последовательности напластований.

В настоящее время секвенная стратиграфия занимается изучением взаимосвязей различных литофациальных типов пород внутри разновозрастного комплекса генетически связанных пластов, ограниченных поверхностями размыва или перерыва в осадконакоплении, что соответствует поверхностям несогласий.

Преимущества этого подхода объясняются тем, что в концепции секвенного анализа выделяемое осадочное тело – секвенция – является хронозначимым, а ограничивающие его поверхности – изохронны и коррелируемы в пространстве; созданная единая унифицированная признаковая база

позволяет обоснованно выделять седиментационные тела и в настоящее время широко применяется на практике, и при выделении секвенций используется высокотехнологичный инструментальный аппарат.

МЕТОДИКА СЕКВЕНСНОГО АНАЛИЗА

Используемая в настоящее время методика выделения секвенций разработана в своей основе исследовательской группой EXXON во главе с П.Р. Вейлом [Vail et al., 1991; Сейсмическая стратиграфия, 1982; Posamentier, Vail, 1988; Vail et al., 1991]. Результаты применения такой методики были продемонстрированы при изучении осадочных бассейнов пассивных окраин. Погружение поверхности накопления осадков в подобных бассейнах происходит в основном под влиянием двух факторов: веса накопившихся толщ и тектонического погружения, связанного с растяжением земной коры и литосферы в целом. При этом процесс осадконакопления в таких условиях протекает циклично, закономерно изменяясь во времени. Он контролируется изменением уровня моря и интенсивностью сноса осадочного материала. Такой режим способствует появлению ярко выраженных несогласных или соответствующих им согласных поверхностей, ограничивающих относительно согласно залегающие последовательности генетически связанных пластов, названных **секвенциями** [Mitchum et al., 1977], что явилось модификацией ранее использованного термина [Sloss, 1973]. Нами такие осадочные тела называются вейлитами. Границы вейлитов формируются в результате относительного понижения уровня моря и выделяются по региональному налеганию (onlap) сверху и срезанию (truncation) снизу. Вейлит состоит из седиментационных комплексов (system tracks), т.е. серии связанных одновременных осадочных систем (depositional system), которые переходят одна в другую во время особой фазы трансгрессивно-регрессивного цикла. Выделение в разрезе вейлитов позволяет понять закономерности палеогеографической истории бассейна, дать перспективный сценарий его дальнейшего развития и сделать прогноз о поисках того или иного полезного ископаемого в его пределах.

Пространственная организация и внутренняя структура седиментационных комплексов, определяемые исключительно колебаниями уровня моря, формируют разрез осадочного чехла, который представляет собой своеобразную летопись изменения уровня эрозионно-седиментационного равновесия в осадочном бассейне. Здесь мы подходим к одному из важнейших аспектов понимания природы генетически связанных слоевых ассоциаций («секвенций», по П.Р. Вейлу), сформированных в течение одного седиментационного цикла. Как должно быть выделено это тело?

Выделить цикл и соответствующие циклиты в разрезе осадочного бассейна очень трудно, тем более важно выделить осадочный циклит для всего бассейна в целом. Без сеймостратиграфического анализа это сделать практически невозможно. Любой цикл относительного изменения уровня моря обычно состоит из постепенного относительного подъема, периода стабилизации и относительно быстрого понижения. Общее поднятие складывается из элементарных этапов быстрых подъемов и стабилизации.

Предложенные П.Р. Вейлом кривые изменения относительного уровня моря по сути отражают суммарный эффект всех ответственных за седиментацию факторов: и эвстазии, и тектоники, и скорости осадконакопления в том или ином бассейне. При изучении осадочных бассейнов необходимо выделить и проследить комплексы пород по всей площади бассейна. Только в этом случае можно реконструировать этапность и особенности его развития. Не в любой точке бассейна можно найти и выделить комплексы пород, соответствующие той или иной стадии осадочного цикла. Между тем, существуют ключевые точки осадочного бассейна, где это можно сделать. Такими областями являются зоны перегиба от шельфа к склону, где формируются проградационные системы (рис. 1, см. цветную вклейку).

На представленной схеме строения окраин осадочного бассейна хорошо видны пространственно-временные соотношения клиноформенных тел, формирующих тракты седиментационных систем: низкого и высокого уровней моря, слагающих вейлиты. Выявив их на сейсмических разрезах, определив принадлежность к тому или иному этапу (стадии) цикла, необходимо проследить разновозрастные толщи на весь бассейн. Таким образом, можно достаточно точно расчленить осадочный разрез на осадочные комплексы разных порядков, а позже перейти к построению кривой эволюции осадочного бассейна. Анализ этой кривой в совокупности с данными о характере строения разноранговых седиментационных комплексов позволяет в деталях реконструировать историю развития осадочного бассейна, дать количественную оценку различным процессам, влияющим на погружение дна бассейна и заполнение его осадками. Такого рода анализ строения осадочного чехла собственно и принято называть секвенсно-стратиграфическим. За рубежом секвенсно-стратиграфические исследования являются обязательным элементом бассейнового анализа. У нас в стране они, к сожалению, еще не получили должного развития. Более того, до настоящего времени в русскоязычной литературе отсутствует даже однозначное понимание сути этих исследований.

Применительно к общепринятой у нас в стране терминологии под **секвенсной стратиграфией** следует понимать **фациальный анализ слоистых геологических тел надпородного уровня организации на основе изучения цикличности (ритмичности) процессов осадконакопления.**

На наш взгляд, секвенсная стратиграфия это не панацея или свод рецептов, а скорее некое руководство к действию, представляющее собой современный концептуальный подход к изучению осадочных бассейнов. Это следующий этап развития осадочной геологии, включающий в себя элементы структурной геологии, откуда вводятся понятия пространства аккомодации, связи тектонических и эвстатических процессов. Объединяя различные дисциплины и используя, таким образом, более широкий спектр информации, секвенсная стратиграфия создает свою базу данных геологических объектов – определенных как в пространстве, так и во времени. **Под пространством аккомодации нами понимается свободное пространство, заполняемое осадочным материалом в процессе седиментации.**

Если ранее фациальные и палеогеографические модели, двух- и трехмерные диаграммы позволяли охарактеризовать бассейн или его часть толь-

ко качественно, то сейчас у нас появились данные, которые в определенной мере и количественно оценивают особенности изучаемого объекта в пространстве и во времени. Собственно говоря, П.Р. Вейл с соавторами сформулировали основные принципы комплексной геологической интерпретации временных сейсмических разрезов в рамках единой концепции, которая получила свое логическое развитие в секвенсно-стратиграфическом анализе. Именно комплексирование сейсмических и других геолого-геофизических данных обеспечило возможность непрерывной корреляции геологических тел в пространстве и во времени: выделение трактов как единых генетических тел, парасеквенций и, наконец, секвенций, или вейлитов. Однако до последнего времени недостаточно полно были освещены приемы и способы распознавания и оценки ведущего фактора в изменении относительного уровня моря.

Любой осадочный разрез – это летопись истории изменения величины пространства аккомодации (П) и условий седиментации внутри седиментационного бассейна. В самом общем виде изменение пространства аккомодации зависит от колебания уровня денудационно-седиментационного равновесия (У), изменения направленности и интенсивности тектонических движений (Т) и объема поступающего материала (Q):

$$П = f(Y) + f(T) + f(Q).$$

Каждый из указанных факторов изменяется во времени, но в своей совокупности они образуют некую устойчивую к внешним воздействиям обстановку осадконакопления, которая сохраняется в течение определенного интервала времени. Это обеспечивает формирование стратиграфически непрерывной последовательности напластований, обладающей строго закономерной внешней формой и внутренней трехчленной структурой. Нижние части вейлита накапливаются в погруженных областях свободного пространства аккомодации в условиях низкого положений базиса равновесия. По мере его подъема, пространство аккомодации увеличивается, и область осадконакопления захватывает все большие площади. В условиях высокого положения базиса равновесия осадконакопление концентрируется на периферии бассейна, создавая для его центральной области дефицит осадочного материала (зоны «отсутствия» осадконакопления). Распределение типов осадка внутри формирующейся последовательности напластования контролируется другими факторами: такими как климат, удаленность от источника сноса и, наконец, положением базиса эрозионно-седиментационного равновесия над поверхностью осадконакопления (в бассейне это глубина моря).

Таким образом, выделение в качестве вейлитов осадочных последовательностей, отвечающих только циклам эвстатических колебаний уровня океана, не всегда правомерно. Столь же несущественными являются такие параметры, как длительность формирования осадочной последовательности, ее мощность и размеры, поскольку они определяются размерами бассейна, скоростью тектонических движений и темпом осадконакопления. Несущественным может оказаться и факт наличия в разрезе даже ярко выраженного перерыва и несогласия, поскольку они могут соответствовать не

границам вейлита, а внутрисеквенсным разделам (границам парасеквенций или трактов осадочных систем).

Единственным критерием выделения вейлита является стратиграфическая непрерывность слагающих его последовательностей напластования, которые сформировались в пределах осадочного бассейна в течение одного полного цикла изменения его аккомодационного пространства. Длительность этого цикла определяется временем восстановления седиментационно-денудационного равновесия в водосборном бассейне между двумя его частями – областью денудации и областью аккумуляции – в результате изменения положения базиса равновесия, либо изменения положения поверхности осадконакопления, либо изменения путей переноса терригенного материала и его объема. Поэтому единственным документом, на основе которого можно однозначно выделить вейлит, служит хроностратиграфический профильный разрез осадочного бассейна, на котором показана последовательность напластования слоев.

Используемая в настоящее время технология построения таких профилей в своей основе была разработана в рамках сейсмостратиграфического анализа [Vail, 1987]. Она предусматривает выделение и трассирование на сейсмическом разрезе поверхностей напластований и несогласий, а также классификацию последних по характеру прекращения прослеживания отражающих горизонтов вблизи границы несогласия. Применение этой технологии обеспечивает надежное выделение секвенций и слагающих их систем напластований (парасеквенций и системных трактов) исключительно по тем сейсмическим разрезам, которые пересекают специфические палеогеографические зоны бассейна – бровки аккумулятивных шельфов либо бровки дельтовых систем, которые образуют перегибы на шельфе, четко выраженные в рельефе дна бассейна.

При построении кривой относительного погружения дна бассейна исследователи группы П.Р. Вейла, учитывая величину подошвенного налегания и бокового наращивания берега, определяли суммарный эффект действия тектонического и эвстатического факторов [Vail, 1987]. Более точно величину тектонического погружения можно получить при проведении палеореконокструкций и выравнивании глубинного разреза в таком участке осадочного бассейна, где подошва и кровля осадочного комплекса субпараллельны, а его внутреннее строение клиноформно. В таком случае величина тектонического прогибания равна мощности осадков в верхней субгоризонтальной части клиноформы.

ВЫДЕЛЕНИЕ ВЕЙЛИТОВ

Секвенсный анализ, как уже говорилось выше, по сути, является комплексным подходом, требующим обязательного синтеза доступных геолого-геофизических данных (обнажение – скважина – временной разрез). Такой подход обеспечивает исследователя корреляционной базой, в основе которой лежит концептуальная модель связи процессов эрозии и осадконакопления с циклическими изменениями уровня моря.

Технология применения секвенсного анализа широко известна и недавно подробно описана в монографии по изучению осадочных бассейнов [Осадочные бассейны..., 2004]. Основным непреложным принципом при проведении секвенсного анализа являются выделение и корреляция в пространстве тел, ограниченных несогласными поверхностями или отвечающими им согласными границами, которые являются изохронными поверхностями. Секвенсный анализ включает такие процедуры.

1. Выделение основных поверхностей несогласия и картирование наиболее крупных геологических тел – вейлитов; это, в свою очередь, включает:

- анализ несогласий на временном разрезе;
- литологическую интерпретацию осадочного разреза с учетом данных коротажа;

- седиментологическую интерпретацию, восстановление обстановок осадконакопления с использованием биостратиграфических и литологических материалов из керна и обнажений;

- определение системы трактов – подкомплексов и границ комплексов;
- корреляцию поверхностей несогласий внутри комплексов и секвенций с обобщением сейсмических данных и данных по скважинам;

- детализацию строения осадочного бассейна и слагающих его тел.

2. Корреляция секвенций с кривой глобальных эвстатических колебаний уровня моря Б.Ю. Хака и П.Р. Вейла [Haq et al., 1988] или с кривой относительного изменения уровня моря, принятой для конкретного бассейна, и датирование их на этой основе.

3. Создание комплексной модели осадконакопления в бассейне, состоящей из:

- определения последовательности развития осадочного бассейна в рамках хроностратиграфической схемы (комбинация эвстатики и тектоники);

- оценки относительного влияния тектонической составляющей на описываемый осадочный объект;

- оценки развития седиментационного пространства – моделирование формирования осадочного бассейна.

Выделенные на этой основе геологические тела легко вписываются в разрезы, построенные в масштабе времени и известные как хроностратиграфические схемы. Построение таких разрезов и обобщенных схем – очень важный инструмент секвенсного анализа, поскольку позволяет наглядно продемонстрировать соотношение областей осадконакопления и перерывов, а также оценивать полноту разреза и непрерывность процесса седиментации. Примеры таких схем приведены на рис. 2 и рис. 3 (см. цветную вкл.) Здесь представлены хроностратиграфические схемы разновозрастных осадочных бассейнов древней Восточно-Европейской и молодой Западно-Сибирской платформ.

Очень часто возникают проблемы построения таких схем из-за недостаточности качественного исходного материала и/или сложной комбинации тектонических и геологических явлений, создающих осадочный разрез. При интерпретации конкретных осадочных бассейнов мы часто встречаемся с отсутствием того или иного тракта или повторением в разрезе одинаковых

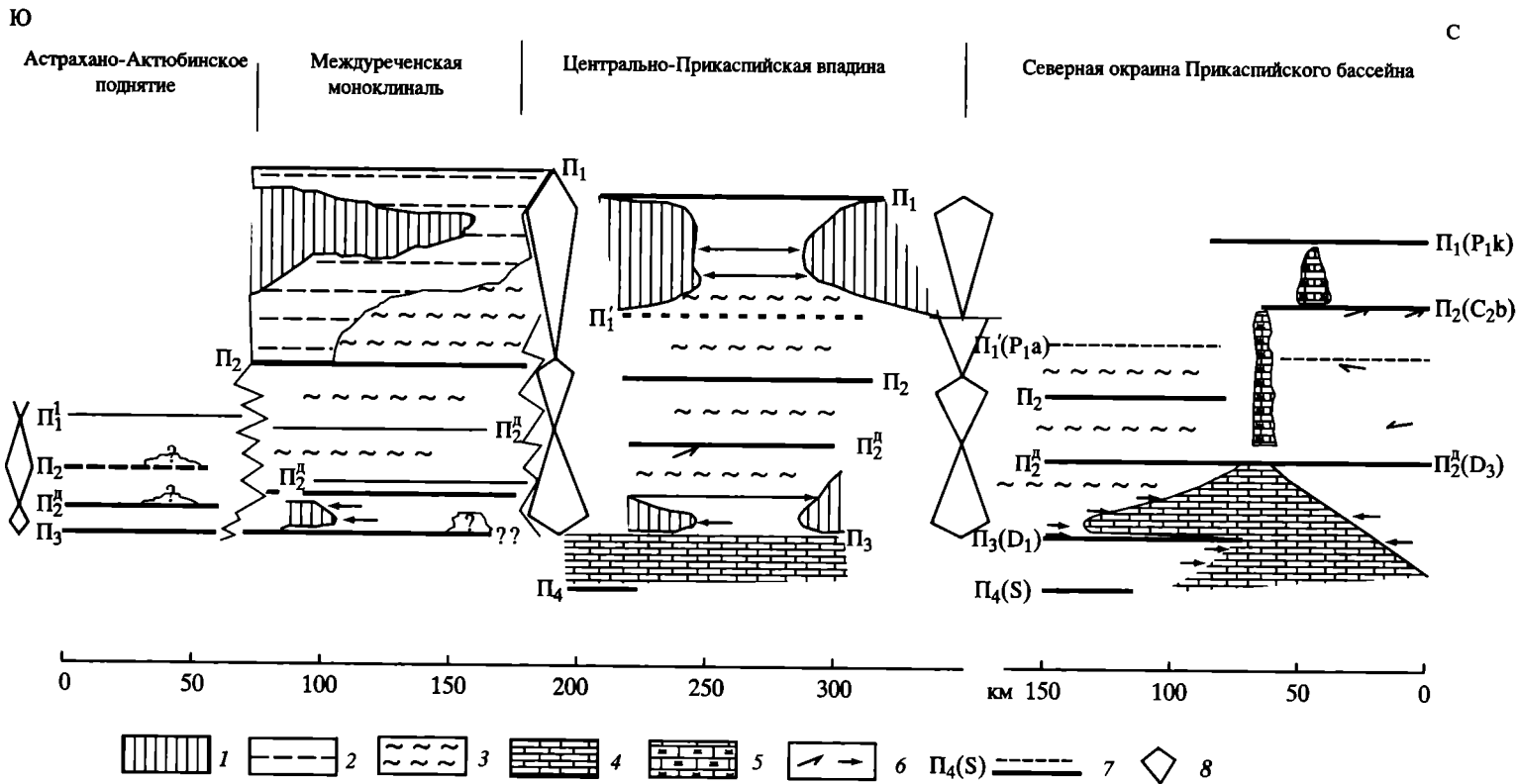


Рис. 2. Хроностратиграфическая схема подсолевого комплекса Прикаспийского осадочного бассейна

1 – перерывы в осадконакоплении; 2, 3 – отложения: относительного мелководья и прибрежной равнины (2) и открытого моря – конденсированная часть разреза (3); 4 – карбонаты котловин; 5 – рифогенные постройки; 6 – кровельное и подошвенное прилегания; 7 – опорные сейсмические горизонты; 8 – седиментационные циклы, по Ю.А. Карагодину

трактов. Это указывает нам на особенности развития конкретного осадочного бассейна.

Первоочередные задачи, решаемые на этом этапе исследования, две: 1) качественная оценка относительного изменения уровня моря и 2) построение количественной кривой относительного изменения уровня моря. Полученные результаты затем используются при реконструкции хода осадочного процесса и создании численных седиментационных моделей. Сам процесс численного моделирования носит интерактивный характер и считается завершенным, если полученная модель отвечает наблюдаемому по скважинам характеру распределения литофаций в разрезе, а слоистость соответствует наблюдаемой на сейсмическом разрезе геометрии отражающих границ.

Эта процедура может быть выполнена только при наличии исходных материалов, отвечающих определенным требованиям. Для построения кривых относительных изменений уровня моря либо глобальной кривой эвстатических колебаний уровня океана необходимо иметь сеть региональных сейсмических профилей и их сейсмостратиграфическую интерпретацию. Эти разрезы должны включать в себя край шельфа, а также содержать (для данного региона) наиболее полную запись прибрежного (трансгрессивного) налегания. Для этих целей желательно иметь сейсмические разрезы высокого качества при достаточном скважинном контроле. Выбранный для анализа участок должен характеризоваться достаточно простым строением, структурные деформации в разрезе должны быть не очень сложными и легко реконструируемыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложенная П.Р. Вейлом методика построения кривых относительного изменения уровня моря (ОИУМ) применима лишь для тех площадей, где имеются разрезы, в которых сохранилась запись прибрежного налегания. На практике такие разрезы встречаются достаточно редко, что резко ограничивает применение этой технологии. Значительно чаще встречаются площади, в разрезах которых сохранилась запись проградационного наращивания бровки аккумулятивного шельфа. Для таких областей также могут быть составлены кривые ОИУМ, однако методика их построения несколько иная и требует более сложного набора процедур. В частности, она предусматривает проведение специальных операций по выравниванию разрезов для учета постседиментационных деформаций. Для этих целей необходимы сейсмические разрезы, на которых хорошо выражены строение анализируемого клиноформенного комплекса (бровка аккумулятивного шельфа и его фондоформенная и ундоформенная части) и структура перекрывающих клиноформу слоев. Кроме того, необходимы веские геологические доказательства того, что кроющая толща представлена мелководными или континентальными отложениями. При соблюдении последнего условия проводимые операции выравнивания разреза по горизонтам, залегающим внутри кроющей толщи, обеспечивают корректный учет влияния постседиментационных деформаций. После снятия влияния постседиментационных деформа-

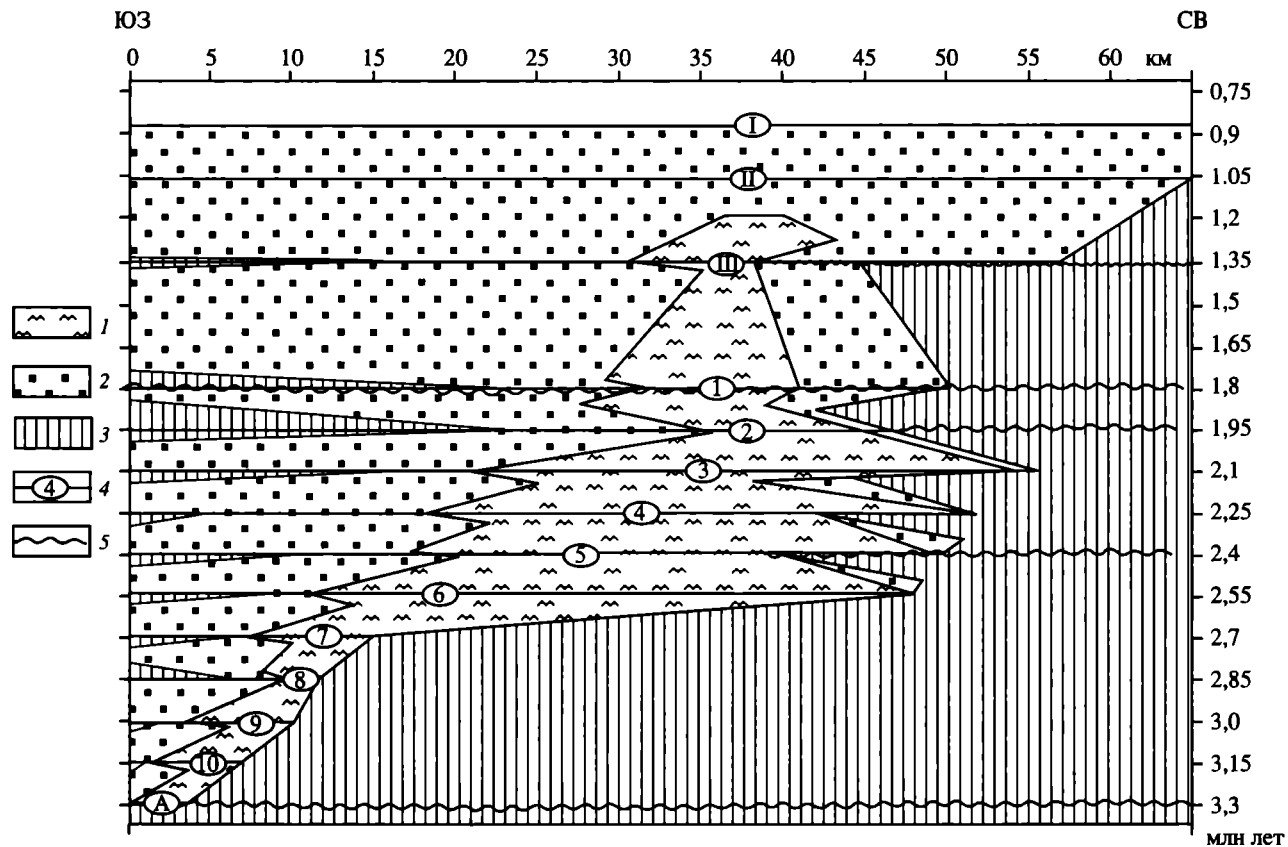


Рис. 4. Хроностратиграфическая схема Каспийского осадочного мегабассейна

1 – отложения открытого моря (конденсированная часть разреза) (глины); 2 – клиноформная часть разреза; 3 – суша (осадки отсутствуют); 4 – сейсмический горизонт (линия максимального затопления) и его индекс; 5 – поверхность несогласия

ций можно приступать к построению кривых относительных колебаний уровня моря по технологии, разработанной П.Р. Вейлом для прибрежной зоны, но уже замеряя приращение высот (расстояния) между двумя смежными точками перегиба аккумулятивного шельфа. Последовательность операций, выполняемых при построении кривых относительного изменения уровня моря по наращиванию шельфа, видна из рассмотрения рисунков на примере Каспийского мегабассейна (рис. 4, см. рис. 3). Ранее подобные исследования были проведены в пределах Западно-Сибирского мегабассейна, где хорошо изучены и датированы опорные отражающие сейсмические горизонты юрско-мелового разреза [Осадочные бассейны..., 2004].

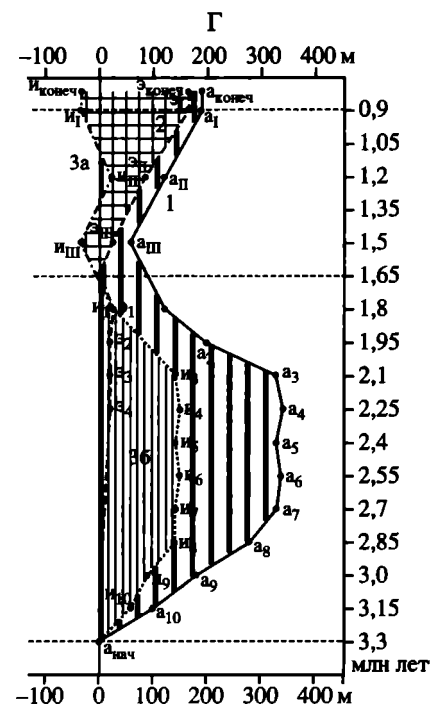
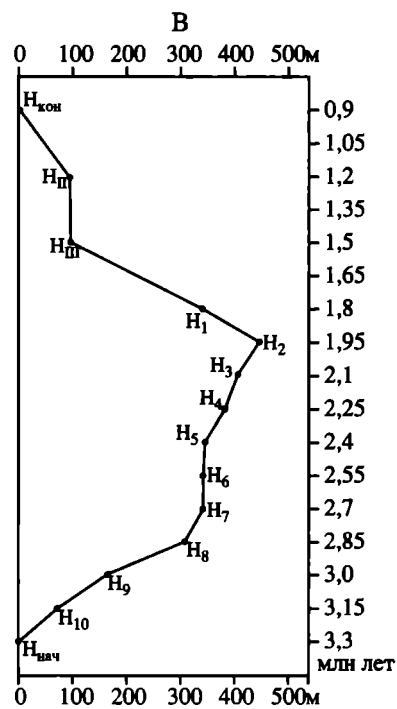
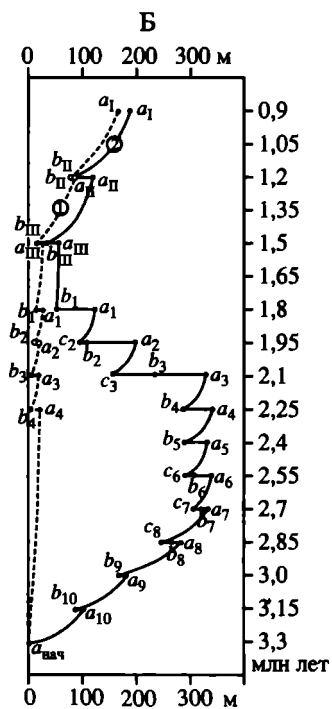
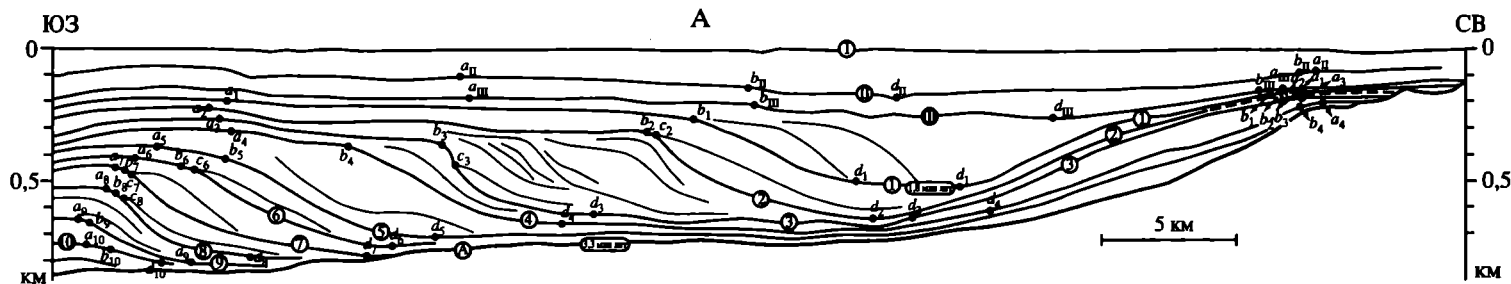
Следует подчеркнуть, что наиболее благоприятными объектами для построения количественных кривых изменения уровня моря являются разрезы пассивных окраин осадочных бассейнов с хорошо выраженными древними береговыми линиями, палеошельфами, палеосклонами и палеокотловинами. Значительно сложнее применить секвенсную стратиграфию в тектонически активных бассейнах. В разрезах этих бассейнов главная роль в формировании аккомодационного пространства принадлежит конседиментационному тектоническому погружению дна бассейна. Низкие палеоуровни, связанные с колебаниями уровня моря, могут быть намечены лишь качественно по наземным эрозионным врезам и фациальной вертикальной последовательности разреза.

Однако необходимо подчеркнуть, что отобранные для анализа сейсмические разрезы должны соответствовать следующим условиям:

- 1) быть непрерывными и пересекать, как минимум, два суббассейна;
- 2) на них должна хорошо прочитываться структура не только клиноформенного комплекса, но и подстилающих и перекрывающих его толщ;
- 3) разрезы должны быть обеспечены данными бурения, свидетельствующими о мелководности отложений, подстилающих и перекрывающих клиноформенный комплекс.

Следующий этап анализа предусматривает построение количественной кривой эвстатических колебаний уровня моря и семейства необходимых для этого вспомогательных кривых, что мы проиллюстрируем на примере позднекайнозойского (акчагыл-апшеронского) Каспийского мегабассейна. К ним относятся кривые: относительных изменений уровня моря, изменения глубин, изменения величины аккомодационного пространства. Для этих целей проводится процедура последовательного (сверху вниз) выравнивания разреза по каждому сейсмическому горизонту с учетом величины эрозионного среза для отдельных интервалов времени (эти интервалы определяются из рисунка сейсмической записи на временном или глубинном разрезе) (рис. 5). Этот прием позволяет учесть постседиментационные дифференцированные (локальные) тектонические движения в бассейне и исключить их влияние на изменение аккомодационного пространства.

Выровненный региональный разрез через Каспийский мегабассейн (см. рис. 5, А) используется для построения ряда вспомогательных кривых. На разрезе определяются характерные точки клиноформ: *a*, *b*, *c* и *d*. При построении кривой относительных изменений уровня моря П.Р. Вейл и его



соавторы использовали точку прибрежного налегания. Анализ поведения этой точки в пространстве приводил к определению величины изменения относительного уровня моря. В большинстве случаев, как упоминалось выше, эта часть разреза осадочного бассейна отсутствует, поэтому нами для количественных расчетов используется точка «а», которая располагается на той же гипсометрической отметке, что и точка прибрежного налегания П.Р. Вейла. Точка *a* – это точка в пределах шельфа, в сторону суши от которой прослеживается область параллельного залегания ундиформенных слоев. Точка *b* – это точка перегиба шельфа. Точка *c* – это точка, маркирующая минимальную отметку падения уровня моря в трактах низкого стояния. Точка *d* фиксирует начало параллельно-слоистых депрессионных горизонтов (начало фондоформы). На разрезе снимаются высотные отметки характерных точек, и их относительные значения откладываются на графике с координатами глубины и времени. Затем приступаем к построению кривой изменения глубин палеобассейна (см. рис. 5, В). Для этого по разрезу вычисляем глубину бассейна на всех временных этапах. Глубина бассейна – это разница между положением точек *a* и *d*.

В приведенном случае в пределах второго, северного, берега из-за интенсивной эрозии срезается верхняя ундиформная часть клиноформ, где располагаются точки *a* и *b*, а субпараллельные слои отвечают стадии высокого уровня моря. Поэтому использовать в построениях данные по северному суббассейну на ранних этапах его развития очень затруднительно. При этом на южном берегу дополнительно происходило накопление клиноформ за счет погружения дна бассейна под весом осадков, и таким образом тектоническая составляющая здесь будет равна величине изостазии плюс мощность осадков на плоскопараллельном участке шельфа. Причем северный берег на протяжении длительного времени подвергался процессам эрозии и размыва.

После проведенных построений кривых (см. рис. 5, Б и В), можно приступить к оценке региональной эвстатической составляющей относительно-го изменения уровня моря рассматриваемых бассейнов. Для этого строится двухмерная модель изменения величины аккомодационного пространства

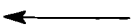


Рис. 5. Кривые относительного изменения уровня моря по выровненному профилю для Каспийского осадочного бассейна

Цифры и буква А в кружках – границы секвенции: I–III – для апшерона; 1–10 – для акчагыла. А – подошва акчагыла

А – выровненный глубинный разрез Каспийского мегабассейна.

Б – кривые относительных колебаний уровня моря: 1 – Северного суббассейна, 2 – Южного суббассейна.

В – кривая изменения относительных глубин Каспийского мегабассейна.

Г – двухмерная модель изменения аккомодационного пространства Каспийского мегабассейна: кривые изменения аккомодационного пространства – общее тектоническое погружение (1), кривая эвстатических колебаний уровня моря (2), кривые изостатического погружения дна бассейна: для апшеронского времени (3а), для акчагыльского времени (3б); 1–3 – изменение аккомодационного пространства за счет: 1 – эвстатического колебания уровня моря, 2 – изостатического погружения под весом осадков, 3 – погружения дна бассейна под воздействием эпейрогенических движений регионального масштаба

(см. рис. 5, Г, кривая 1), что представляет собой график скорости его изменения и указывает на различный характер развития во времени относительных движений в пределах Каспийского мегабассейна в акчагыльское и апшеронское время. В начале этапа наблюдалось относительное поднятие уровня до максимальных отметок в 340–350 м, после чего – относительное падение до отметок + 50 м. В апшеронское время происходил относительный подъем уровня. Кривые 1 и 2 получаются путем соединения точек *a*, взятых без изменения с рис. 5, Б. Величина изостатического погружения («и») является производной от значения глубинной отметки точки «а» на кривой (1). Она рассчитывается по формуле:

$$и = H \frac{\sigma_m - \sigma_o}{\sigma_m - \sigma_b}$$

где *H* – значение относительной глубины характерной точки; σ_m – плотность мантии; σ_o – плотность осадков; σ_b – плотность воды. Разница между величиной характерной точки «а» и расчетной величиной «и» позволяет определить координаты точек (э) и построить по ним кривую колебаний уровня моря (кривая 2 на рис. 5, Г).

Как видно из анализа этой кривой, в развитии Каспийского мегабассейна четко выделяются два крупных цикла относительного изменения уровня моря – акчагыльский и апшеронский, при общей тенденции к его повышению.

Акчагыльский «трансгрессивный» этап развития непосредственно продолжает плиоценовую историю Терско-Каспийского мегабассейна. Конец понта – начало балахана – это время падения уровня Мирового океана и изоляции внутриконтинентальных глубоководных бассейнов Северного Перететиса, которые потеряли с ним свои связи. С этим же временем связано формирование изолированного Каспийского моря-озера. Перед началом геократической эпохи зеркало воды Каспийского моря-озера охватывало территорию современной Прикаспийской, Западно-Туркменской и Куринской низменностей. Бровка мелководного шельфа располагалась на широте Мангышлакского порога. Граница глубоководной котловины проходила: на севере по линии Дербент – Красноводск, на востоке (в Туркмении) по линии Небит-Даг – Кызыл-Атрек и на западе (в Азербайджане) – по нижнему течению р. Кура. В глубоководной котловине Южного Каспия глубины моря достигали 1500 м. Морфологические зоны Каспийского моря-озера соответствовали следующим тектоническим структурам: область котловинной части бассейна – Южно-Каспийской впадине, северный шельф – Бакайской синеклизе, западный – Куриному прогибу, восточный – Западно-Туркменской депрессии, а северный склон котловины – Терско-Каспийскому прогибу. Наиболее активной структурой являлась Южно-Каспийская впадина, примыкающая к складчатым системам Большого Кавказа, Эльбурса и Копетдага.

Начало геократической эпохи на Кавказе и Копетдаге совпало с роданской и валахской фазами складчатости, которые сопровождались усилением

погружения в Южно-Каспийской котловине. Только в течение понтического времени (на протяжении почти 2 млн лет) величина погружения Южно-Каспийской котловины составила около 1 км [Осадочные бассейны..., 2004]. В условиях замкнутого водоема столь значительные погружения дна котловины вызвали резкое понижение уровня воды всего водоема – уровень Каспийского моря-озера в балаханское время, по оценкам различных авторов, понизился до отметок $-700+/-1000$ м [Лаврушин и др., 2001]. Падение уровня моря и оформление нового профиля равновесия привело к формированию на бывшем шельфе глубокого (амплитудой до 400 м) и обширного (от Урала до Волги) вреза и выработке контрастных форм эрозионного рельефа на склонах котловины. В результате была сформирована густая сеть глубоких подводных и наземных каньонов, по которым огромное количество терригенного материала перемещалось во внутренние части осадочного бассейна. Мощные клиноформные толщи конусов выноса накапливались в пределах подножия континентального склона, образуя подводные части дельты пра-Волги к северу от Апшеронского полуострова, пра-Амударьи – на восточной окраине Южно-Каспийской котловины. Формирование этих осадочных комплексов продолжалось на протяжении всего раннего и среднего плиоцена, в результате чего накопилась мощная, до 5 км, продуктивная толща на западе Южно-Каспийской котловины и красноцветная – на востоке. Это привело к заполнению и дополнительному погружению котловины. Ее размеры по площади сократились. Эрозионные процессы активно происходили в самых погруженных частях осадочного бассейна, формируя глубокий наземный врез в пределах обширной прибрежной равнины, возникшей на месте шельфа и погруженного шельфа.

Заполнение Южно-Каспийского бассейна осадками вызвало подъем уровня моря. Интенсивная эрозия выработала глубокий врез и способствовала в результате расширению площади водосборного бассейна за счет перехвата части стока рек Западной Сибири и, в частности, включения Ишимского водосборного бассейна. Увеличение площади водосбора и вскрытие эрозионными процессами артезианских вод мел-палеогеновых горизонтов привело к акчагыльскому потопу и формированию относительно пресноводного водоема [Лаврушин и др., 2001]. Характер распространения в разрезе клиноформных тел и соотношение их внутри вейлитов отражает эволюцию изменения во времени поверхности аккумуляционного пространства Каспийского мегабассейна, что и демонстрирует кривая относительно изменения уровня моря (см. рис. 5). Уровень моря акчагыльского бассейна изменялся от 0 до 150 м, в апшеронское время колебался в пределах от -40 м до 20–30 м.

Эти данные могут быть использованы при построении глобальной кривой общих колебаний уровня Мирового океана. Однако для ее достоверного построения необходимо иметь также материалы по большой совокупности бассейнов прошлого.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует сказать, что для целей палеогеографии, в частности для определения эвстатических колебаний уровня моря, можно успешно использовать материалы секвенсно-стратиграфического анализа. Для того чтобы определить масштаб колебаний уровня моря, представляется полезным воспользоваться данными по вейлитам, которые трактуются как элементарные хронозначимые с пульсационно-непрерывным характером слоистые ассоциации внутри единой системы осадочного бассейна, генетически связанные с относительными колебаниями уровня моря.

Описанная методика построения кривых эвстатических колебаний уровня моря может быть применима и при построении кривых колебания базиса эрозии бассейнов разных типов в том числе глубоководных внутриконтинентальных бассейнов и относительно мелководных. Этот метод представляет особый интерес также для сопоставления строения континентальных аллювиальных толщ прибрежной равнины с одновозрастными морскими осадками, с одной стороны, и речными и озерными фациями – с другой, а также для выяснения природы и происхождения различных типов эоловой стратификации. Смена положения базиса эрозии находит прямое отражение в строении речных долин и озерных водоемов и заполняющих их осадочных толщ. При низком положении базиса эрозии активизируются денудационные процессы, расширяется площадь сбора обломочного материала, и в бассейне накапливаются преимущественно грубообломочные отложения. При повышении уровня базиса эрозии изменяется динамика транспортных потоков, седиментационная обстановка стабилизируется, накапливается более тонкий материал, который захороняет (кольматирует) и сглаживает следы размыва и эрозии. Рассмотренные примеры говорят о широкой возможности применения секвенсно-стратиграфического анализа для осадочных бассейнов не только пассивных и активных океанических окраин, но и континентальных осадочных бассейнов. Вместе с тем, проведенные исследования показывают не только широкие возможности методики секвенсного анализа, но и ограничения его использования. Для устранения этих ограничений необходимо накапливать и обобщать подобный геолого-геофизический материал для различных типов осадочных бассейнов. Кроме того, в будущем следует совершенствовать и проверять предложенную методику на различных геологических объектах.

И все-таки, еще раз повторим, что благодаря развитию и успехам секвенсной стратиграфии, появилась возможность:

- разделить оценить величину и амплитуду эвстатических падений и подъемов уровня моря и тектонических погружений или воздыманий дна бассейна регионального масштаба и учесть их влияние на ход осадочного процесса;
- составить реальное представление о соотношении областей компенсированного, некомпенсированного и перекомпенсированного прогибания на континентах;
- изменить представления о природе фиксируемых в разрезах эпиконтинентальных бассейнов, контрастных форм эрозионного рельефа;

– решить проблему полноты и детальности хроностратиграфических шкал регионального и локального масштабов в рамках бассейна, мегабассейна и системы бассейнов, непрерывно прослеживая и коррелируя реперные горизонты;

– количественно оценить амплитуду и размах изменений уровня моря в зависимости от величины тектонических движений, выявляя связь осадочного процесса с эндогенными и экзогенными событиями глобального и регионального масштаба.

Развитие секвенсно-стратиграфических исследований способствует решению фундаментальных проблем стратиграфии, обозначенных в недавно опубликованной монографии Ю.Б. Гладенкова «Биосферная стратиграфия» [Гладенков, 2004]. В частности они незаменимы при детализации региональных стратиграфических схем и достоверной корреляции стратиграфических разрезов внутри осадочного бассейна или его частей, где распространены отложения различных генетических типов. Но эти же исследования крайне важны при палеогеографических реконструкциях, на что много лет назад обращал внимание В.В. Меннер. Именно он в начале 70-х годов прошлого века поддержал сеймостратиграфию, а затем и секвенсную стратиграфию, к которым многие в те годы относились достаточно скептически.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 03-05-6425, рук. Ю.А. Волож), а также при финансовой поддержке Программы «Научные школы» грант № НШ-1982.2003.5 (руководитель Ю.Г. Леонов).

ЛИТЕРАТУРА

- Англо-русский словарь по циклостратиграфии: (Основные термины и определения). Нефтеюганск: АМОСО, 1995. 62 с.
- Бабадаглы В.А., Джумагулов А., Шебалдина М.Г., Яцкевич С.В. Использование ритмичности осадконакопления при поисках нефти и газа // Цикличность осадконакопления и закономерности размещения горючих полезных ископаемых. Новосибирск: СО АН СССР, 1975. С. 166–167.
- Вассоевич Н.Б. Происхождение нефти // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 1975. № 6. С. 3–23.
- Волож Ю.А., Ковылин В.М., Милитенко Н.В., Шлезингер А.Е. Внутренняя расшифровка осадочных бассейнов сеймостратиграфией // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1994. Т. 69, вып. 3. С. 137–141.
- Геоисторический и геодинамический анализ осадочных бассейнов. М.: МПР РФ: ЦРГЦ; Геокарт: МГУ, 1999. 524 с.
- Геологические явления в сейсмических волновых полях и прогноз неантиклинальных ловушек: (Атлас временных разрезов) / Под ред. Г.Н. Гогоненкова и др. М.: ЦГЭ, 1991. 257 с.
- Гладенков Ю.Б. Биосферная стратиграфия. М.: ГЕОС, 2004. 100 с.
- Гладенков Ю.Б., Кунин Н.Я., Шлезингер А.Е. Сеймостратиграфия и ее развитие в Советском Союзе: (Основные направления и перспективы) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1984. № 4. С. 3–20.
- Гогоненков Г.Н., Эльманович С.С., Кирсанов В.В., Михайлов Ю.А. Методика комплексной интерпретации геолого-геофизических данных на сеймостратиграфической основе. М., 1984. 46 с. (Газовая промышленность СССР. Сер. Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений: Обзор. информ.; Вып. 4).
- Карогодин Ю.Н. Седиментационная цикличность. М.: Недра, 1980. 242 с.

- Карогодин Ю.Н., Арментроут Д.М.* Анализ основных понятий и терминов литмологии и сквенстратиграфии // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 7. С. 3–11.
- Карогодин Ю.Н., Казаненков В.А., Рьльков С.А., Ершов С.В.* Северное Приобье Западной Сибири: Геология и нефтегазоносность неокома: (Системно-литмологический подход). Новосибирск: ГЕО, 2000. 200 с.
- Кунин Н.Я.* Современное состояние сейсмостратиграфии и проблемы ее использования при изучении нефтегазоносности Западной Сибири // Сейсмостратиграфические исследования при поисках месторождений нефти и газа. Алма-Ата: Наука, КазССР, 1988. С. 139–158.
- Кунин Н.Я., Кучерук Е.В.* Сейсмостратиграфия в решении проблем поисков и разведки месторождений нефти и газа. М.: ВИНТИ, 1984. 198 с. (Итоги науки и техники. Месторождения горючих полезных ископаемых; Вып. 13).
- Лаврушин Ю.А., Леонов Ю.Г., Лилиенберг Д.А.* Направления и результаты изучения влияния геологических факторов на колебание уровня Каспийского моря // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: ГЕО, 2001. С. 105–130.
- Осадочные бассейны: Методика изучения, строение и эволюция / Под ред. Ю.Г. Леонова и Ю.А. Воложа. М.: Научный мир. 2004. 526 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 543).
- Попов В.И., Тихомиров С.В., Макарова С.Д., Филиппов А.А.* Ритмостратиграфические (циклостратиграфические) и литостратиграфические подразделения. Ташкент: Фан, 1979. 112 с.
- Пути детализации стратиграфических схем и палеогеографические реконструкции. М.: ГЕОС, 2001. 278 с.
- Сейсмическая стратиграфия / Под ред. Н.Я. Кунина, Г.Н. Гогоненкова. М.: Мир, 1982. Т. 1. 376 с.; Т. 2. 470 с.
- Фролов В.Т.* Циклы и циклиты – атрибуты геологических процессов и формаций // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. 1998. № 2. С. 3–11.
- Хаин В.Е.* Основные проблемы современной геологии. М.: Научный мир, 2003. 384 с.
- Шлезингер А.Е.* Региональная сейсмостратиграфия. М.: Научный мир, 1998. 144 с.
- Graciansky P.Ch., Hardenbol J., Jacquin T., Vail P.R.* Mesozoic and Cenozoic sequence stratigraphy of European basins. Tulsa (Okla.), 1998. 790 p. (SEPM Spec. Publ.; N 60).
- Haq B., Hardenbol J., Vail P.* Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and eustatic cycles of sea-level change // Sea-level changes: An integrated approach. Tulsa (Okla.), 1988. P. 71–108. (SEPM Spec. Publ.; N 42).
- Mitchum R.V., Vail P.R., Thompson S.* Seismic stratigraphy and global changes in sea level. Pt 2. The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis // Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration. Wash. (D.C.), 1977. P. 53–62. (Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.; Vol. 26).
- Posamentier H.W., Vail P.R.* Eustatic control on clastic deposition II – sequence and systems tract models // In Sea-level changes: An integrated approach. Tulsa: (Okla.), 1988. P. 124–154. (SEPM Spec. Publ.; N 42).
- Seismic stratigraphy-application to hydrocarbon exploration / Ed. C.E. Paxton. Wash. (D.C.), 1977. 514 p. (Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem.; Vol. 26).
- Sloss L.L.* Tectonic and eustatic factors in the late Precambrian-Phanerozoic global sea level changes // Geol. Soc. Amer. Abstr. 1973. Vol. 5, N 7. P. 813.
- Vail P.R.* Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Atlas of seismic stratigraphy // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1987. Vol. 27, N 1. P. 1–10.
- Vail P.R., Audemard F., Bowman S.A. et al.* The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology – an overview // Cycles and events in stratigraphy. Berlin; Heidelberg: Springer, 1991. Chap. 6. P. 617–659.