

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПБГУ)

Институт наук о Земле
Кафедра региональной геологии

Овсянникова Екатерина Станиславовна

Анализ прогибания осадочных бассейнов в программе BasinVis 2.0

Курсовая работа
по направлению 05.03.01 «Геология»

Научный руководитель:
к.г.-м.н, доц. В.Б.Ершова

(подпись руководителя)

« » 2021

Санкт-Петербург
2021

Содержание.

Введение.	3
I. Осадочные бассейны.	5
II. Бассейновый анализ.	7
• Механизмы и анализ прогибания.	8
III. Полное (суммарное) прогибание.	11
• Анализ полного прогибания.	11
• Тренд уплотнения.	12
IV. Тектоническое прогибание.	16
• Палеобатиметрия и изменение уровня моря.	17
• Метод Flexural Backstripping.	18
• Типы тектонических прогибаний.	19
V. Пост-рифтовое тепловое прогибание.	21
VI. Геологическое строение исследуемого региона.	23
VII. Пример расчёта прогибания осадочного бассейна в программе BasinVis 2.0	26
• Особенности работы в программе.	26
• Пример расчета.	26
Заключение.	32
Список литературы.	33

Введение.

Цель данной работы – сбор и анализ опубликованных данных об осадочных бассейнах, их прогибаниях и роли анализа, моделирования и визуализации прогибаний в изучении эволюции осадочных бассейнов.

Осадочные бассейны – это области, образовавшиеся в результате длительного тектонического прогибания земной поверхности. Осадки в этих областях накапливаются до значительной толщины и сохраняются в течение длительных геологических периодов времени.

На земной поверхности имеется множество осадочных бассейнов, сформировавшихся в разных геологических условиях. Классификация и номенклатура бассейнов основаны на характеристиках бассейна во время *седиментации* (образование всех видов осадков в природных условиях путем перехода осаждаемого материала из подвижного или взвешенного состояния (в водной или воздушной среде) в неподвижное – осадок).

Современные классификации осадочных бассейнов основаны на геодинамической природе их формирования. Осадочные бассейны классифицируются, в основном, по трем критериям:

- тип земной коры, на которой находится и формируется бассейн
- положение бассейна относительно краев плит
- тип взаимодействия плит, происходящего во время седиментации

Осадконакопление в бассейне возможно правильно реконструировать только при условии понимания всех факторов, влияющих на его эволюцию. Поэтому бассейновый анализ необходим для исследования условий формирования и эволюции бассейнов, а методы моделирования – для восстановления и визуализации предметов исследования.

Мною были поставлены следующие задачи:

1. Сбор и анализ литературы, связанной с осадочными бассейнами, бассейновым анализом, примерами применения бассейнового анализа и моделирования прогибаний осадочных бассейнов, особенностями работы в программе BasinVis 2.0, а также литературы по региональным особенностям объекта моего исследования – Приверхоянского краевого прогиба.
2. Рассмотреть типы прогибаний осадочных бассейнов, изучить аспекты и особенности, влияющие на понимание и расчёт прогибаний осадочных бассейнов.

3. Рассчитать прогибание осадочного бассейна на примере Джарджанской скважины Приверхоянского прогиба в BasinVis 2.0, программного обеспечения на базе MATLAB®.
4. Изучить на английском языке основные геологические термины, а также термины, связанные с бассейновым анализом. Усовершенствовать навык чтения научной литературы на английском и перевода подобной литературы с английского языка на русский.

I. Осадочные бассейны.

Осадочные породы и отложения, покрывающие значительные площади планеты, отвечают не только связь геосферы с биосферой и антропосферой – они также являются неотъемлемой частью основных природных ресурсов, таких как подземные воды и углеводороды.

Чтобы понять внутреннюю структуру бассейна, заполняющие отложения документируются относительно составляющих архитектуры бассейна: условия осадконакопления, петрографического состава, стратиграфической полноты, осадочных фаций и их связи с разломами и деформациями.

Объемы осадков в основном зависят от скорости эрозии в источники сноса осадков. Осадки превращаются в осадочные породы в процессе консолидации, которая включает уплотнение твердой каркасной структуры и заполнение пор. Важно учитывать так же и то, что слой мелкозернистого осадка будет уплотняться даже под собственным весом и/или незначительными нагрузками. Прогрессивное захоронение осадков (погружение) под нижележащими слоями в бассейне осадконакопления вызывает ряд физических и химических изменений в осадочном бассейне, среди них – потеря пористости, увеличение объемной плотности и уменьшение мощности слоев при постепенном погружении.

Поясним предыдущий абзац:

Сжимаемость (Compressibility) относится к упругой характеристике твердого материала. Она позволяет уменьшить объем, вызванный увеличением давления. При этом уменьшение объема, естественно, влечет за собой увеличение объемной плотности в образце или стратиграфической единице.

Консолидация (Consolidation) – термин, обычно применяемый к почвам и молодым отложениям, определяется как уменьшение объема за счет потери воды под статической нагрузкой, приводящей к увеличению прочности.

Уплотнение (Compaction) – изменение объема осадка в результате нагрузки (т.е. гравитационного веса вышележащей колонны водонасыщенного осадка), связанное с сокращением пространства между твердой каркасной структурой. Предполагается, что уплотнение вызывает вертикальное уменьшение слоя осадка без изменения горизонтальных направлений, следовательно, это одноосное напряжение.

Уменьшение пористости (Porosity loss) относится к потере объема пор, происходящем при захоронении осадка. Захоронение может не сопровождаться

изменением объема — например, цементация песчаника может привести к потере пористости, но не изменит объем, занимаемый осадочной породой.

Таким образом, сочетания различных факторов в пространстве и времени дают важнейшие доказательства для понимания тектонических и экологических условий, которые имели место в ходе эволюции бассейна — задающие тип, размер, продолжительность жизни и потенциал сохранения отложений осадочных бассейнов. Сопоставлять эти факторы для понимания общей картины нам как раз помогает бассейновый анализ.

II. Бассейновый анализ.

Эволюция осадочного бассейна зависит от ряда факторов: системы осаджения палеоэкологических условий, тектонической активности прилегающих плит, термических изменений, потока флюидов, разломов и структурных особенностей. Интегрированное и синтезированное изучение осадочных бассейнов называется «бассейновым анализом» (Рис. 1)

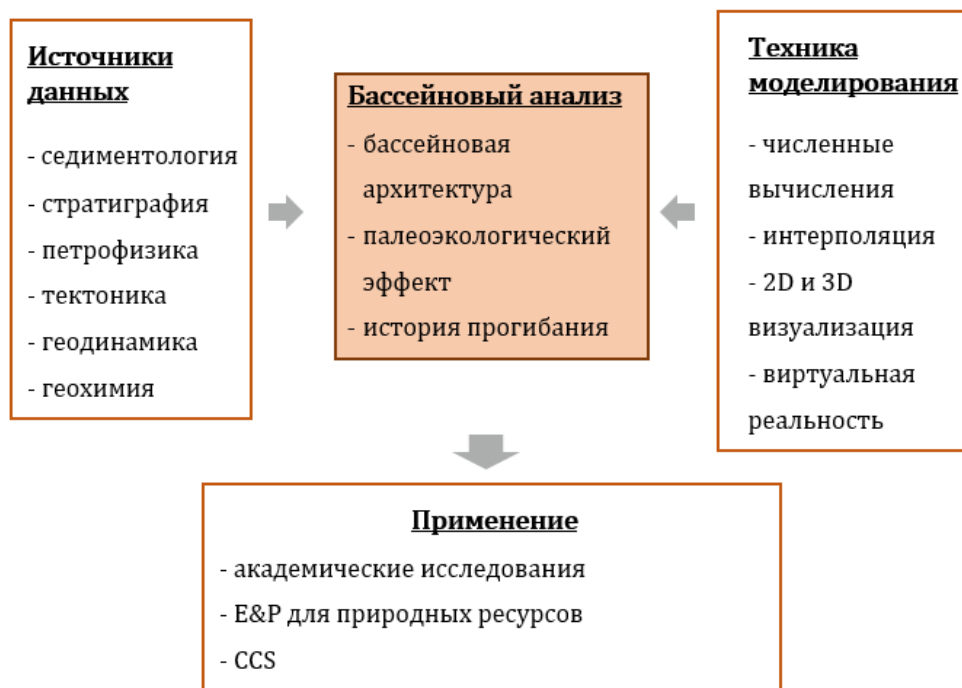


Рис. 1. Концепция процесса бассейнового анализа.

Работа по анализу бассейнов требует, как сбора и интерпретации различных геоданных, так и способности анализировать связи между различными типами явлений (например, осадочная петрология, фациальный анализ, литостратиграфия, биостратиграфия, последовательная стратиграфия, сейсмическая стратиграфия, геофизика, геодинамика, петрофизика, неорганическая и органическая геохимия).

Так же, численные и графические методы моделирования также необходимы для интеграции результатов. Получается, что бассейновый анализ и моделирование являются областью для исследования комплексного формирования и эволюции бассейнов, которые в основном рассматриваются с учетом архитектуры бассейнов, палеоэкологических эффектов и истории прогибания.

Изучение бассейнового анализа и моделирования не ограничивается чисто академическими исследованиями, но и применяется к промышленному и коммерческому

интересу к основанным осадочным бассейнам. Многие бассейны в мире интенсивно исследуются и считаются важными районами, поскольку осадочные породы бассейнов возрастом от архея до кайнозоя содержат большую часть невозобновляемых топливных ресурсов (углеводородов), множество металлов и минералов. В последнее время бассейны также изучаются для улавливания и хранения углерода (Carbon Capture and Storage) и развития геотермальной энергии.

Теперь ответим на вопрос о том, почему прогибания вообще возникают и как это происходит.

Механизмы и анализ прогибания.

Прогибание осадочных бассейнов порождает пространство для заполнения осадками, которое называется пространство аккомодации. Оно происходит в результате различных процессов, которые в основном сводятся к **семи механизмам**:

1. Утонение земной коры, вызванное главным образом экстенсинальным растяжением земной коры, поверхностной эрозией при подъеме и выходом магмы.
2. Утолщение мантии-литосферы, вызванное превращением астеносферы в мантийную литосферу при охлаждении, последующим прекращением растяжения земной коры или аккреции расплавов и нагрева, производимого астеносферой.
3. Осадочная и вулканическая нагрузки, обусловленные локальной изостатической компенсацией изгиба земной коры и/или региональной литосферы в процессе седиментации и вулканизма.
4. Тектоническая нагрузка, вызванная локальной изостатической компенсацией изгиба земной коры и/или региональной литосферы при недозагрузке.
5. Субкристальная нагрузка, вызванная субкристальными плотными нагрузками, такими как магматические нижние плиты или продуцированные мантийные клинья.
6. Астеносферный поток (динамическая топография), вызванный спуском или расслоением субдуцирующих холодных литосферных плит.
7. Уплотнение земной коры, вызванное изменением давления/температурных условий и/или внедрение расплавов с более высокой плотностью в кору с более низкой плотностью.

Важно понимать, что эти механизмы применимы для разных типов бассейнов и могут совместно работать в одном типе бассейна.

В данной работе я буду рассматривать три типа анализа прогибания в соответствии с тем, что вызывает прогибание:

- **полное (суммарное) прогибание**
- **тектоническое прогибание**
- **пост-рифтовое тепловое прогибание**

Полное прогибание (также называемое прогибанием фундамента) представляет собой общую глубину (общую толщину накопления отложений) осадочного бассейна в течение геологического времени. Глубина эта является результатом вклада всех факторов, включая тектонику, осадочную нагрузку, палеобатиметрические вариации и глобальное изменение уровня моря.

Тектоническое прогибание есть прогибание, вызванное тектонической движущей силой.

Пострифтовое тепловое прогибание представляет собой релаксацию изотерм литосферы, которая зависит от величины растяжения в бассейне.

Три модели прогибания имеют большое значение для понимания эволюции осадочного бассейна. Из-за эффекта уплотнения нынешний стратиграфический каркас заполнения осадочного бассейна не соответствует первичной толщине каждого осадочного слоя, а также общей глубине за период времени. Поэтому восстановление толщин уплотненных слоев с использованием соответствующего тренда уплотнения (декомпрессии) является решающим шагом для начала анализа прогибания, и общее количество восстановленных толщин во времени приводит к общему прогибанию. Анализ тектонического прогибания (backstripping) удаляет осадочную нагрузку и палеоэкологические эффекты из общей глубины прогибания, чтобы выявить величину прогибания, вызванного тектонической движущей силой.

Кривые тектонического прогибания могут служить индикатором для распознавания типа бассейна, поскольку бассейны, в сходных тектонических условиях демонстрируют сходные закономерности в формах тектонического прогибания. Во многих бассейнах наблюдается пост-рифтовое тепловое прогибание, вызванное релаксацией изотерм литосферы до их растяжения. Термическое прогибание обычно оценивается путем

применения соответствующих коэффициентов растяжения (β) к кривой тектонического прогибания, наблюдаемой из пост-рифтовой фазы.

III. Полное (суммарное) прогибание.

Стратиграфическая последовательность (например, возраст, толщина, литология) заполнения осадочного бассейна обычно известна по данным обнажения, скважины и сейсмического отражения. Однако модель возрастной глубины, полученная из структуры в настоящее время, как упоминалось ранее, не равна тождественно первичной толщине, а также толщине каждого осадочного слоя, изменяющейся с течением времени. Причина в том, что толщины нижележащих слоев недооцениваются относительно эффекта уплотнения.

Уплотнение приводит к уменьшению толщины нижележащих слоев под действием веса вышележащих осадочных слоев, нагрузки осадка. Чтобы понять эволюцию осадочного бассейна, крайне важно восстановить толщину уплотненных слоев во времени. Общая величина восстановленной толщины накопленных слоев служит основой для анализа суммарного прогибания.

Анализ полного прогибания.

Анализ полного прогибания начинается с разделения стратиграфической колонки по толщине и возрастному диапазону и представляет собой соотношение между пористостью и глубиной на участке. Соответствующий *тренд уплотнения* (в следующей главе мы рассмотрим этот термин подробнее) применяется для последовательного декомпактирования («прессования») толщины каждого уплотненного нижележащего слоя. Этот процесс называется «*декомпрессией*», которая в основном представляет собой расчет толщины осадочного слоя для любого времени и глубины. Прощую толщину каждого осадочного слоя вычисляют с помощью уравнения *тренда уплотнения*, которое показывает, как правило, экспоненциальное уменьшение пористости с глубиной.

В результате процесса декомпрессии, полученная первичная толщина каждого декомпрессированного слоя также используется для оценки реальных скоростей прогибания во времени. Поскольку осадочный бассейн содержит несколько слоев, этот анализ должен восстановить все стратиграфические единицы в последовательности для каждого временного промежутка. Он обрабатывает декомпозицию более молодых блоков и уплотнение более старых, а общее прогибание получается суммированием толщин всех блоков в определенный момент времени. (Рис. 2)

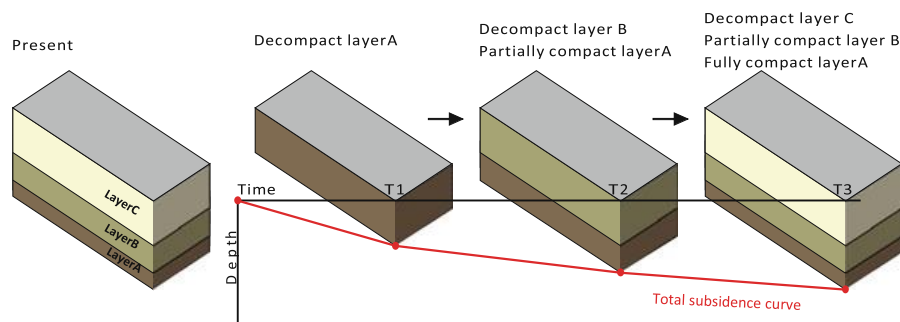


Рис. 2. Концепция последовательных стадий декомпрессии при анализе полного прогибания. (*Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreich Michael*)

Анализ полного прогибания опирается, в первую очередь, на декомпрессию каждой стратиграфической единицы до их правильной толщины в интересующий нас момент времени. Две другие поправки – изменения глубины оседания воды во времени и абсолютного колебания уровня моря, сделаны для построения графика прогибания относительно фиксированного базиса. (Рис. 3)

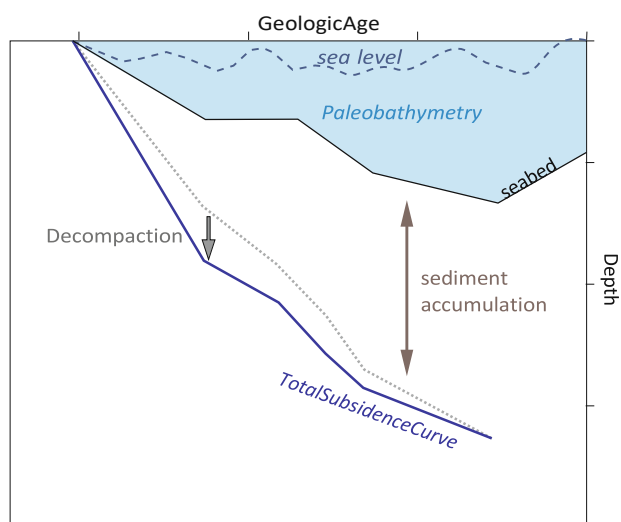


Рис. 3. Процесс анализа общего геологического прогибания. Серая пунктирная линия: кривая накопления отложений в настоящее время (относительно фиксированных данных палеобатиметрии и изменения уровня моря), Синяя сплошная линия: кривая полного прогибания, рассчитанная методом декомпрессии. (*Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreich Michael*)

Тренд уплотнения.

Уплотнение происходит в накопленных пористых породах в результате нагрузки, и изменяет расстояние между зернами (упаковка зерна), а также типы зерновых контактов.

Пористость (\emptyset) определяется как отношение объема порового (пустотного) пространства к общему объему породы и зависит главным образом от размера зерен, формы, сортировки и степени уплотнения.

В осадочных породах неизбежно уменьшается пористость при захоронении, что является результатом взаимосвязи трех процессов, таких, как:

1. *Механическое уплотнение* – механическое перераспределение и сжатие зерен под воздействием вышележащих осадков.
2. *Физико-химическое уплотнение*, обусловленное такими процессами, как растворение под давлением, наиболее развито в карбонатах.
3. *Цементация* – заполнение порового пространства в ходе химических реакций. Химическое уплотнение более интенсивно в нижних частях осадочного бассейна, где этот процесс ускоряется повышенными температурами.

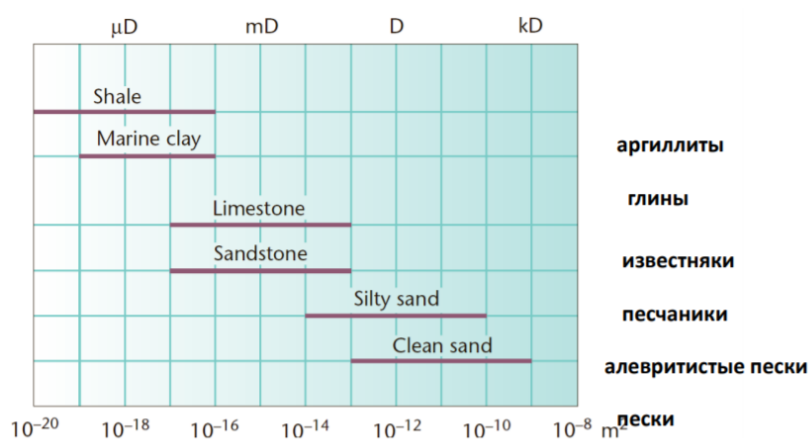


Рис. 4. Проницаемость различных по составу пород и осадков. (*Ershova V. B.*)

Эти процессы контролируются различными внутренними и внешними факторами, включая глубину(нагрузку), первичную литологию, осадочную фацию, состав каркасных зерен, поток жидкости, температуру и время. Все эти факторы, в совокупности, управляют скоростью изменения пористости.

Для измерения значений пористости осадочных пород применяются различные методы.

Существует несколько методов, которые могут помочь в получении информации о пористости из необработанных геологических и геофизических данных. Кроме того, используя объемную долю глины, можно количественно определить пористость смеси крупных и мелких частиц.

Чтобы оценить общее прогибание, необходимо восстановить толщину каждого слоя в течение геологического времени, используя соответствующие тенденции сжатия осадочного бассейна (декомпрессии). Поэтому крайне важно понять взаимосвязь между пористостью и глубиной захоронения и вывести соответствующее уравнение *тренда уплотнения* из данных по пористости. Существует много опубликованных соотношений пористости и глубины для различных осадочных пород, поскольку эта взаимосвязь является вопросом не только количественной оценки прогибания, но и оценки качества материнских пород и коллекторов). *Тренд уплотнения (отношение пористости к глубине)* обычно выстраивается экспоненциально с увеличением глубины захоронения на основе эмпирических и теоретических исследований, к примеру, Aty 1930; Sclater and Christie 1980; Schmoker and Halley 1982; Bond and Kominz 1984;

$$\phi = \phi_0 e^{-y/c}$$

где ϕ - пористость на глубине y , ϕ_0 - начальная пористость при нахождении слоя на поверхности, c - коэффициент уплотнения.

Более широко используемое соотношение пористости и глубины имеет вид отрицательной экспоненты (Athy 1930; Hedberg 1936), что приводит к асимптотической низкой пористости с увеличением глубины.

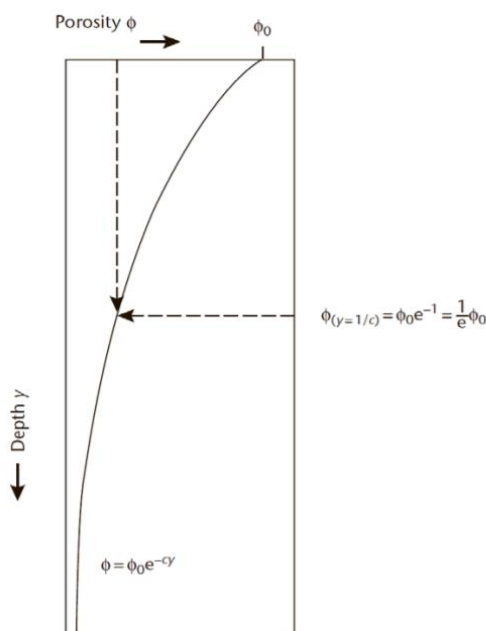


Рис. 5. Схематическая диаграмма, иллюстрирующая использование коэффициента c .

(Erchova V.B.)

Несколько исследований показали, что лучше подходят тенденции уплотнения с линейным трендом y/c (например, Bjørlykke et al. 1989), двойным экспоненциальным трендом (например, Kominz et al. 2011) и экспоненциально-линейным трендом (например, Cao et al. 2017).

IV. Тектоническое прогибание.

В то время как общее прогибание включает вклад всех факторов (например, осадочная нагрузка, глубина воды и уровень моря), влияющих на прогибание осадочного бассейна, тектоническое прогибание пытается реконструировать «тектоническую движущую силу».

Реконструкция тектонического прогибания очень важна для выявления бассейнообразующих процессов без учета изменяющейся осадочной нагрузки и палеосреды, а также для получения представления о тектонической движущей силе. Поэтому анализ прогибаний является полезным инструментом для выявления тектонических условий и истории развития особенно ископаемых осадочных бассейнов, к примеру, включенных в орогены. Поскольку многие осадочные бассейны испытали на себе множество движущих механизмов прогибания за прошедшее время, кривая тектонического прогибания отражает региональную эпизодическую тектонику.

Таким образом, отчетливая картина общего или определенного участка кривой тектонического прогибания может дать конкретную информацию о важных локальных деталях движущих сил и тектонических изменениях в прошлом.

Анализ тектонических прогибаний – это процедура выявления тектонической составляющей в прогибании осадочного бассейна. Он сохраняет изостатическое равновесие между литосферной колонной, проходящей через осадочный бассейн, и колонной, в которой осадочная нагрузка была удалена и заменена водой. Этот процесс называется *методом обратного смещения (backstripping method)* и представляет собой метод прогрессивного перемещения изостатически осадочной нагрузки из бассейна и коррекции для уплотнения, палеобатиметрии и изменения уровня моря. (Рис. 6).

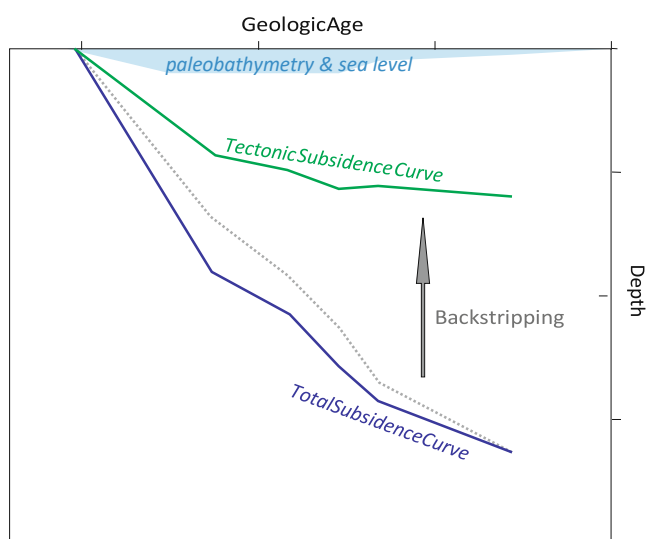


Рис. 6. Процесс анализа тектонических прогибаний. (*Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreich Michael*)

Серая пунктирная линия: кривая накопления отложений в настоящее время, синяя сплошная линия: кривая полного прогибания, зеленая сплошная линия: кривая тектонического прогибания, рассчитанная методом обратного смещения (backstripping method).

Палеобатиметрия и изменение уровня моря.

Для того чтобы получить более точную модель эволюции бассейна, вертикальные изменения, вызванные вариацией палеобатиметрии (наука, занимающаяся изучением подводных глубин предыдущих эпох) (Wd) и относительным изменением уровня моря (SL), должны быть интегрированы в метод обратного смещения (backstripping method) для анализа прогибания.

Оценка палеобатиметрии может быть произведена путем извлечения палеонтологических данных из самих слоев отложений. Часто используемые методы включают соотношение планктонных и бентических фораминифер – например, Van der Zwaan et al. 1990, диапазоны глубин бентических фораминифер или других ископаемых групп, а также седиментологические/палеоэкологические исследования фаций.

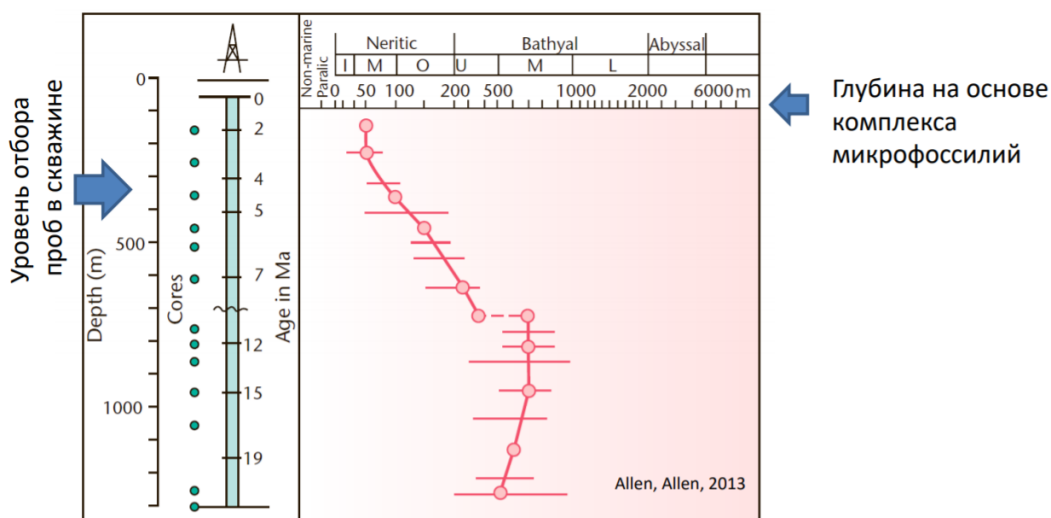


Рис. 7. Пример оценки глубины формирования осадков на основе микрофоссилий. (*Ershova V. B.*)

Палеобатиметрию определяют, основываясь на ряде критериев:

1. Микро- и макрофауна. На основе палеоэкологических исследований определяют среду обитания фоссилий и вероятную палеоглубину формирования осадков, в которые они заключены.
2. Фациальный анализ. На основе текстурно-структурных особенностей и состава пород определяют глубину их формирования.

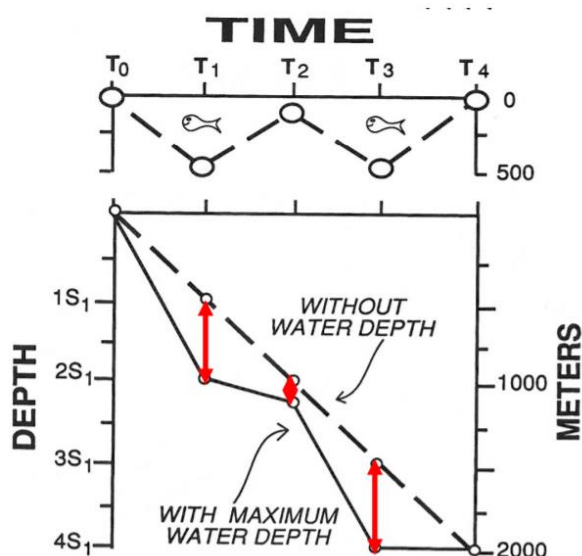


Рис. 8. Влияние палеобатиметрии на пригибание осадочного бассейна. Красная стрелка показывает разницу в форме кривой с учетом и без учета глубины осадконакопления. (*Ershova V. B.*)

Существует несколько глобальных моделей изменения уровня моря, однако также существует несколько факторов и проблем для количественной оценки палеобатиметрии и изменения уровня моря, к которым относятся неполные записи отложений, различные интерпретационные моменты, состояние сохранения микрофоссилий и неоднозначная связь между эвстазией и (региональным) тектонизмом (к примеру, динамическая топография). Эти неопределенности могут внести ошибку в модель прогибания.

Метод Flexural Backstripping.

Сейсмическое профилирование определяет структуру земной коры и заполнение бассейна. Сейсмический профиль можно рассматривать как ряд столбцов, использующихся для анализа истории прогибания, которая должна быть *деконволютирована* (процесс, используемый для усиления сигналов из записанных данных) в ряд рифтовых эпизодов, а также для расчета коэффициента растяжения по профилю земной коры для каждого эпизода. Литосфера подстилающая осадочные бассейны на своем протяжении может рассматриваться как изгибающаяся пластина, поэтому нагрузка осадков скорее будет

компенсирована за счет изгиба литосферы, чем за счет вертикальных движений (Airy Isostasy).

Чтобы понять прогиб литосферы под периодической нагрузкой, применяется метод "Flexural Backstripping". Методика определения жесткости изгиба нижележащей литосферы и пространственного распределения осадочной нагрузки, а также процедура Flexural Backstripping обычно выполняются последовательно на ряде слоев осадочных пород. Затем изгиб задается:

$$Y(k) = \frac{(\rho_s - \rho_w)S(k)}{\rho_m - \rho_s}$$

где $Y(k)$ - частотный эквивалент изгиба, $S(k)$ - частотный эквивалент толщины осадка и (k) - волновое число функции, эквивалентной степени компенсации C .

Типы тектонических прогибаний.

Бассейны в сходных тектонических условиях демонстрируют сходные закономерности тектонического прогибания, поэтому кривые тектонического прогибания могут быть индикатором для распознавания типа бассейна. Xie and Heller (2009) и Allen and Allen (2013) сопоставили опубликованные кривые и охарактеризовали тектоническую картину прогибания **пяти типов бассейнов**: пассивные окраины (passive margins), внутрикратонные бассейны (синеклизы), при сдвиговые бассейны, передовые прогибы и преддуговые бассейны.

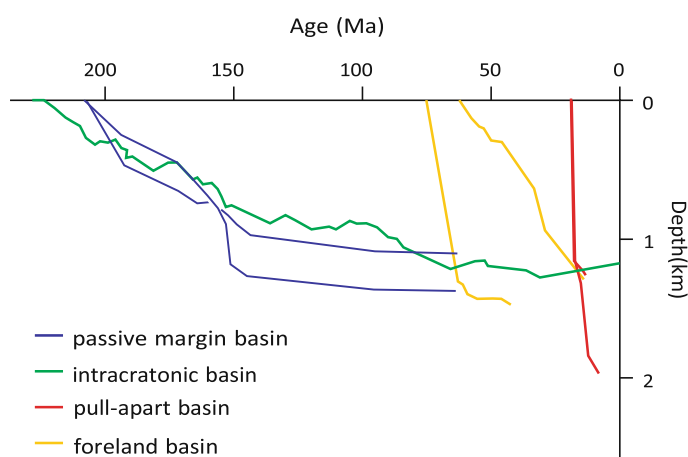


Рис. 9. Сравнение кривых разных типов тектонического прогибания осадочных бассейнов. (*Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreeich Michael*)

1. Кривые тектонического прогибания бассейнов вдоль пассивной окраины обычно состоят из быстрого синрифтового тектонического прогибания и медленного пострифтового термического прогибания. Прогибание обычно продолжается более 150 млн лет, а значение максимального прогибания колеблется до 4 км в зависимости от расстояния к морю от шарнирной зоны, например, Атлантическая окраина США, Марокканский бассейн, бассейн Кампоса, бассейн Гипсленда.
2. Внутрикратонное тектоническое прогибание обычно является долгоживущим (обычно >200 млн лет) и относительно медленным (<2 км) на довольно большой площади (>150 000 км²). Это согласуется с охлаждением после теплового возмущения толстой литосферы, например, бассейн Иллинойса, бассейн Мичигана, бассейн Уиллистона.
3. Тектоническое прогибание бассейнов (например, раздвигающегося бассейнового типа), связанное с при сдвиговыми тектоническими изменениями, обычно недолговечно (обычно <10 млн лет) с очень быстрым и прерывистым прогибанием. Во многих случаях прогибание носит эпизодический характер и заканчивается резко, превышая обычно 2 км. Это зависит от пространственной конфигурации различных масштабов страйк-системы неисправностей в бассейне.
4. Тектоническое прогибание передовых прогибов отражает изгибную реакцию на эпизодическое надвиговое нагружение (временнотрангрессивное прогибание) и перемежается выпуклыми вверх сегментами. Максимальная величина тектонического прогибания обычно составляет ~3 км. Например, бассейн Южной Альберты, бассейн Пиренейского Фореланда, бассейн Швейцарской Молассы.
5. Кривые тектонического прогибания для преддуговых бассейнов имеют самый разнообразный диапазон форм и наименее последовательные модели прогибания, поскольку размеры и конфигурации преддуговых бассейнов сильно варьируются.

V. Пост-рифтовое тепловое прогибание.

Во многих бассейнов растяжения, прогибание состоит из двух компонентов, которые являются областью син-рифтового прогибания (syn-rift прогибание) и теплового прогибания (post-rift прогибание).

Первоначальное разломно-контролируемое прогибание вызвано хрупким растяжением земной коры при растяжении литосферы. Оно происходит мгновенно и зависит от начальной толщины земной коры в сравнении с начальной толщиной литосферы и величины фактора растяжения.

Последующее тепловое прогибание вызвано релаксацией литосферных изотерм до их преднатяжительного положения (прогрессивный возврат к тепловому равновесию), которое зависит от величины растяжения. *Пост-рифтовое тепловое прогибание* – это разница между контролируемым разломовым прогибанием и конечным полным прогибанием, по сравнению с кривой тектонического прогибания, наблюдаемой в пост-рифтовой фазе (Рис. 10).

Рис. 10. Процесс анализа термической просадочности геологического возраста после рифта. *Серая пунктирная линия:* кривая накопления отложений в настоящее время, *синяя сплошная линия:* кривая полного прогибания, *зеленая сплошная линия:* кривая тектонического прогибания. *Красная пунктирная линия:* экспоненциальная кривая теплового прогибания после рифта с использованием соответствующего коэффициента растяжения. (Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreich Michael)

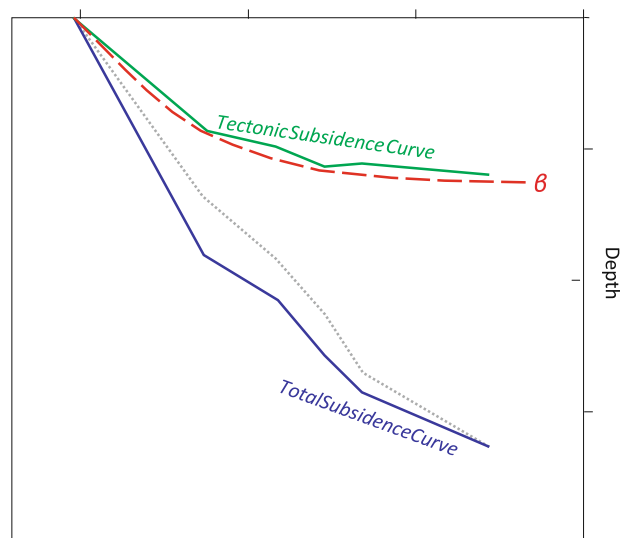
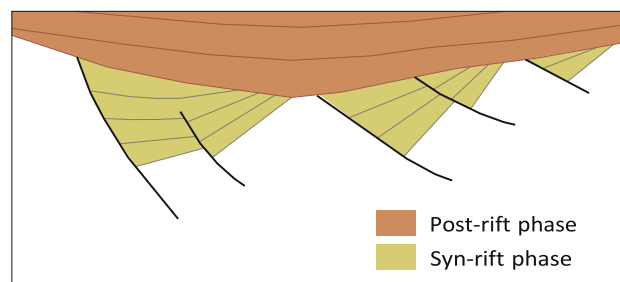


Рис. 11. Схематическое поперечное сечение, иллюстрирующее синрифтовую фазу и пострифтовую фазу. (Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreich Michael)



Поскольку постепенное возвращение к тепловому равновесию литосферной изотермы с приводит к пост-рифтовому тепловому прогибанию, основным механизмом теплового прогибания является охлаждение после истончения литосферы. Расчетное охлаждение со временем экспоненциально возрастает, а шкала времени определяется диффузионной тепловой постоянной времени литосферы. Поэтому постразломное тепловое прогибание с течением времени имеет вид отрицательной экспоненты, амплитуда которой увеличивается с коэффициентом растяжения (β).

Коэффициент растяжения (β) имеет решающее значение для оценки термического прогибания после рифта, которое рассчитывается с использованием удлиненной l по сравнению с исходной:

$$\beta = \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}$$

где l_0 - начальная ширина куска литосферы l_0 и величина расширения l . А также можно рассчитать коэффициент растяжения (β) по пост-рифтовому термическому прогибанию. Тепловое же прогибание, вызванное растяжением, может быть получено аналитически с помощью следующей формулы:

$$S_t = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_s} \alpha_v T_a y_L$$

VI. Геологическое строение исследуемого региона.

Верхоянский складчатонадвиговой пояс располагается вдоль восточной окраины Сибирской платформы и протягивается в субдолготном направлении на 2500 км при ширине до 500 км от побережья моря Лаптевых на севере практически до Удской губы Охотского моря на юге. Пояс сложен осадочными образованиями Верхоянской пассивной континентальной окраины, по своей протяженности и ширине он сопоставим с аналогичным поясом Кордильер Северной Америки.

Верхоянский пояс подразделяется на приплатформенную зону *форланда* (внешняя часть устойчивой области платформы, примыкающая к орогену) и расположенную восточнее зону *хинтерланда* (устойчивый массив, оказывающий давление с тыла на формирующуюся складчатую (орогенную) область).

Со стороны платформы к поясу примыкает **Приверхоянский краевой прогиб** (Рис. 12), образованный верхнеюрско-меловыми отложениями мощностью до 7 км. Глубина залегания поверхности фундамента здесь достигает 14 км. В центральной своей части краевой прогиб сливается с Вилуйской синеклизой.

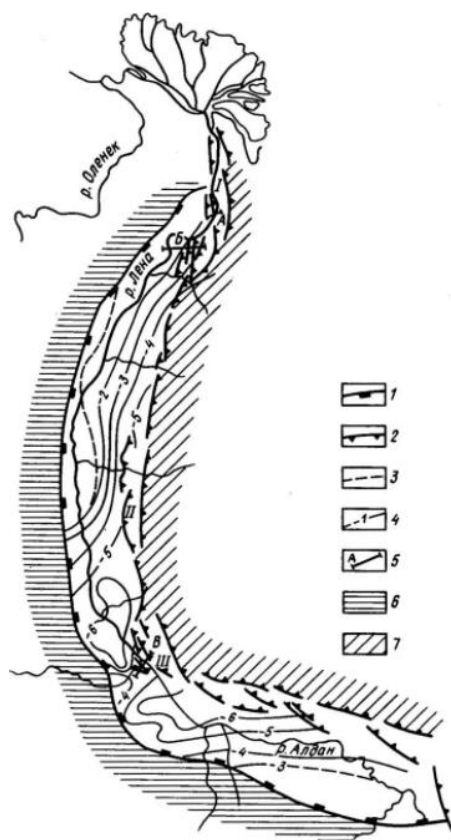


Рис. 12. Приверхоянский краевой прогиб. (А. Ф. Сафронов, В.Ф. Горбачев, 1991)

Поговорим подробнее о Приверхоянском краевом прогибе.

Приверхоянский прогиб возник как краевой прогиб Верхоянской складчатой области в период ее воздымания в позднеюрскую эпоху и развивался до конца мелового периода, мощность отложений составляет около 3500 м. Он представляет собой огромную впадину, протягивающуюся в виде крутой дуги свыше 1200 км вдоль долины Лены и Алдана. Краевая часть Сибирской платформы была втянута в прогиб в период его активного развития. На юге прогиб замыкается в районе среднего течения р. Алдана, на севере же, сужаясь, переходит в Хатангскую синеклизу. С Верхоянской антиклинальной зоной на востоке и Байкало-Алданским щитом на юге прогиб сочленяется сериями разломов. На западе в средней своей части он сливается с Вилюйской синеклизой с образованием на стыке глубокой впадины.

Как и все краевые прогибы, Приверхоянский краевой прогиб имеет асимметричное строение. В нем выделяются внешняя и внутренняя зоны. Из них внешняя — приплатформенная, внутренняя — примыкающая к складчатым сооружениям Верхоянских гор.

Во внутренней зоне породы собраны в узкие линейные складки, которые выполаживаются по направлению к внешней зоне, в то время как во внешней зоне дислокации пород имеют платформенный характер. Сильно возрастает степень метаморфизма выполняющих прогиб пород по мере приближения к складчатой области.

Немного о стратиграфии: в Предверхоянском прогибе пока установлены только отложения мезозоя и кайнозоя. Из кайнозойских отложений в пределах прогиба развиты только четвертичные. Из мезозойской же группы в прогибе наиболее древними являются нижнетриасовые отложения — они были найдены на левобережье Лены во внешней, приплатформенной зоне прогиба и представляют собой морские, в основном обломочные отложения — аргиллиты, алевролиты и песчаники с линзами из ракушечного известняка. Мощность толщи морских отложений 150 м, однако в западном направлении морские отложения сравнительно быстро сменяются сокращающимися в мощности континентальными угленосными отложениями.

Также в прогибе хорошо представлены и юрские отложения: они подразделяются на нижнюю и верхнюю серии.

Нижняя серия по возрасту соответствует нижней, средней юре и состоит из морских отложений — песчаников с прослоями аргиллитов и алевролитов общей мощностью до 1500 м. Во внутренней зоне прогиба нижняя часть данной серии сложена континентальными отложениями. Верхняя же серия по возрасту отвечает верхней юре — сложена она песчаниками с пачками алевролитов и аргиллитов и пластами угля общей мощностью до 1000 м. Во внешней, приплатформенной зоне верхние части данной серии слагаются уже морскими осадками. В нижнем течении Лены верхняя юра вся представлена морскими отложениями.

Толща меловых отложений представлена нижним и верхним отделами.

Нижний — характеризуется угленосными континентальными отложениями. Во внутренней зоне прогиба нижний мел выражен в основном песчаниками с пластами и пачками каменных углей общей мощностью до 2000 м и более.

Толща верхнего мела отмечается только в приплатформенной, внешней зоне прогиба. Здесь она делится на нижнюю и верхнюю свиты. Из них нижняя свита сложена песками, песчаниками, конгломератами и тонкими линзами угля общей мощностью 700—800 м. Верхняя свита представлена каолинистыми песками и глинами общей мощностью 150—200 м.

VII. Пример расчёта прогибания осадочного бассейна в программе BasinVis 2.0

Особенности работы в программе.

BasinVis 2.0 – это пакет для обработки и визуализации стратиграфической обстановки и эволюции оседания осадочных бассейнов по скважинным данным. BasinVis реализован в MATLAB – среде численных вычислений, и использует два численных метода: интерполяцию и анализ оседания. В этой программе для моделирования поверхности предусмотрены пять различных методов интерполяции (линейный, естественный, кубический сплайн, кригинг и тонкопластинчатый сплайн)

Анализ оседания состоит из декомпрессии и обратных технологий. BasinVis включает в себя пять основных этапов обработки:

1. настройка (область исследования и стратиграфические единицы)
2. загрузка данных скважины
3. визуализация стратиграфической установки
4. ввод параметров прогибания
5. анализ и визуализация прогиба

Для углубленного анализа программное обеспечение предоставляет инструменты для устранения поперечных сечений и провалов скольжения.

Графический интерфейс предоставляет инструменты для анализа и экспорта результатов. Результаты интерполяции и оседания кэшируются для минимизации избыточных вычислений и повышения интерактивности программы. Все 2D и 3D визуализации создаются с помощью функций построения графиков MATLAB, что позволяет пользователям точно настраивать отображаемый результат.

Пример расчета.

Мы рассчитаем прогибание осадочного бассейна на примере Джарджанской скважины Приверхоянского краевого прогиба. (Рис. 13)

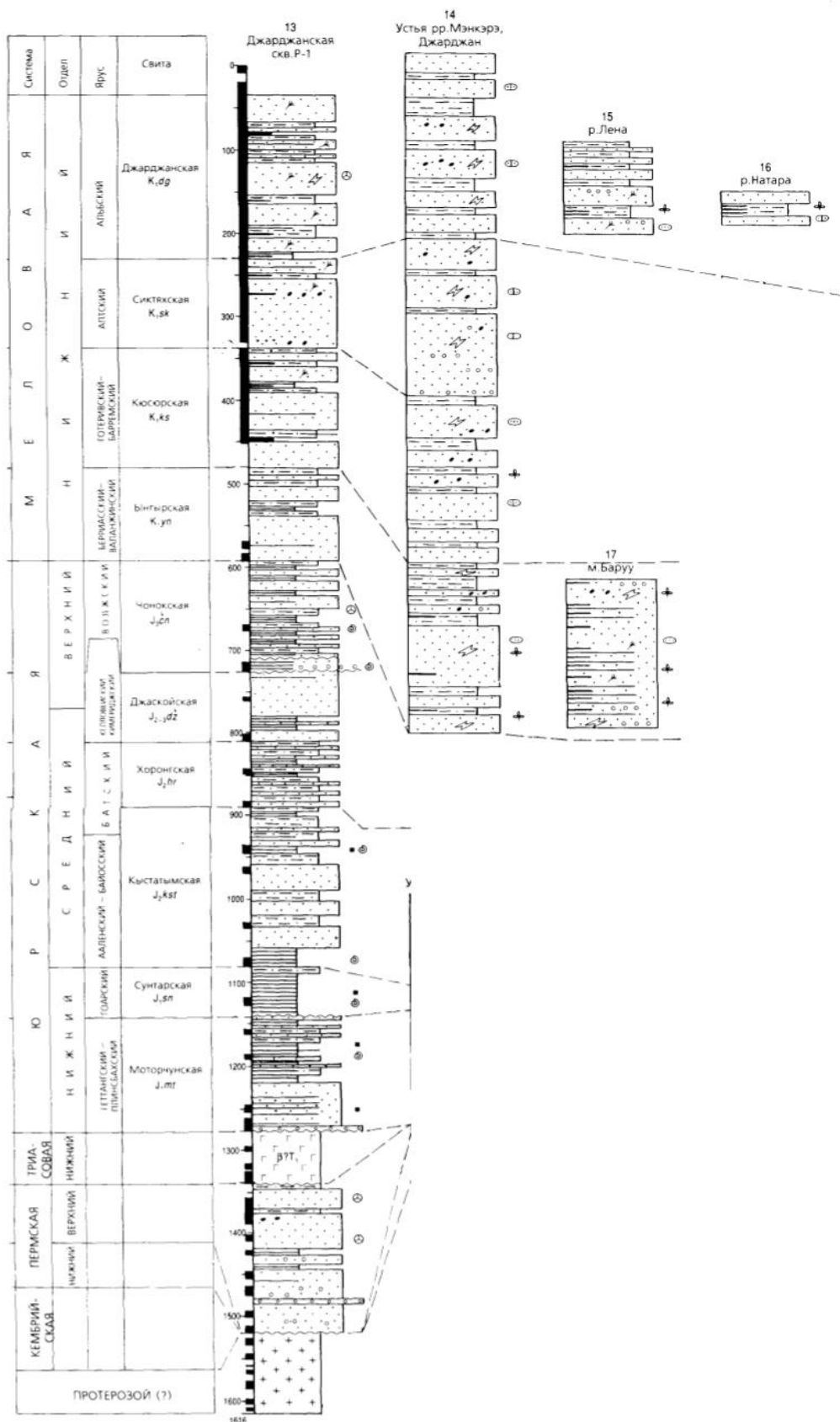


Рис. 13.

После ввода всех необходимых параметров (область исследования, стратиграфические единицы, данные скважины, параметры декомпрессии), построили профиль седиментации и получили графики Возраста-Глубины, Толщины-Глубины, Скорости осадконакопления-Глубины, Толщины-Возраста, Скорости-Возраста. Представлены показатели Седиментации-Возраста для рассматриваемой скважины (Рис.14).

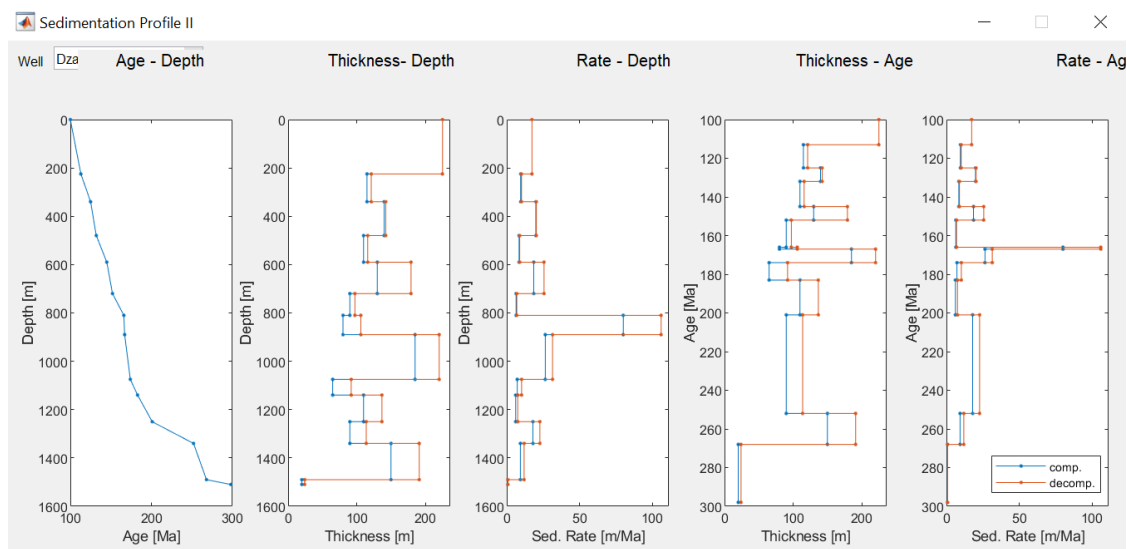


Рис. 14. Профиль седиментации: графики с текущей (compacted) толщиной каждой стратиграфической единицы.

Далее построили 2D-график прогибания, он позволяет представлять глубину и скорость полного и тектонического прогибания. Палеобатемитрическая характеристика обозначена синими полосами в верхней части графика. (Рис. 15)

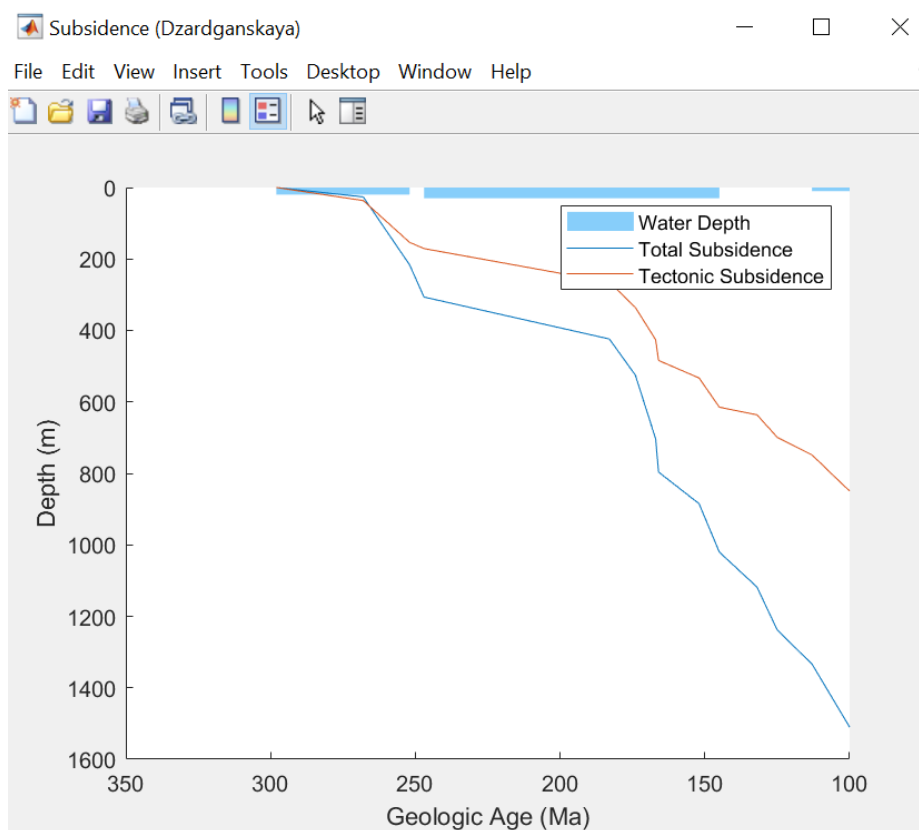


Рис. 15. График прогибания осадочного бассейна Приверхоянского краевого прогиба.

В окне «Subsidence Analysis» отображаются числовые результаты декомпрессии и бэкстриппинга (backstripping) . (Рис.16-19)

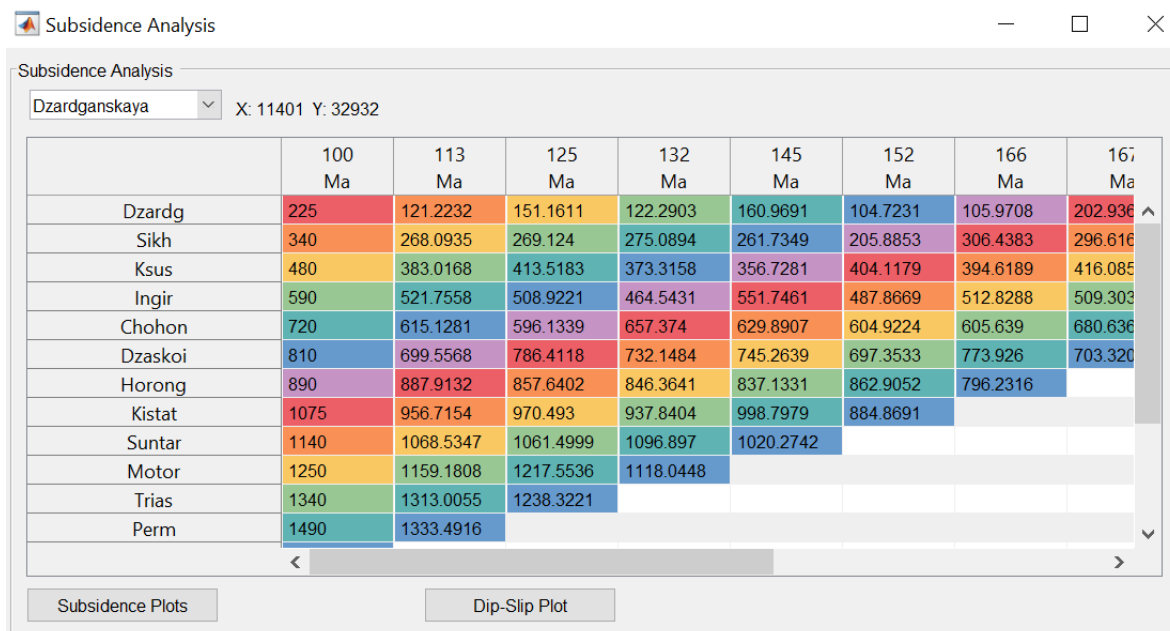


Рис. 16.

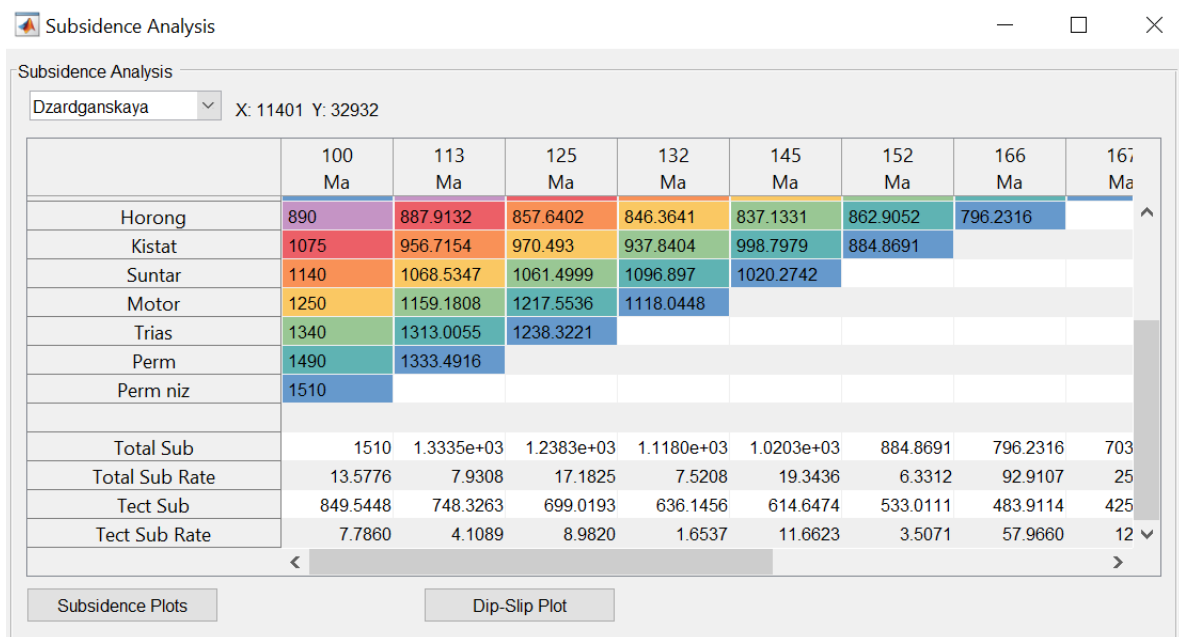


Рис. 17.

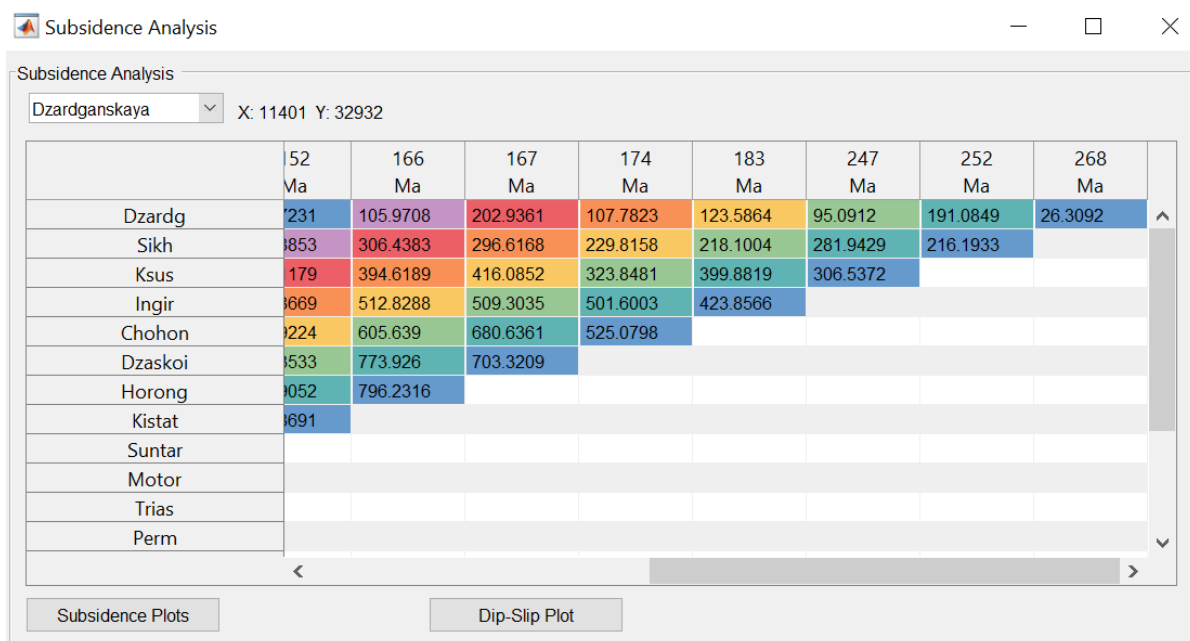


Рис. 18.

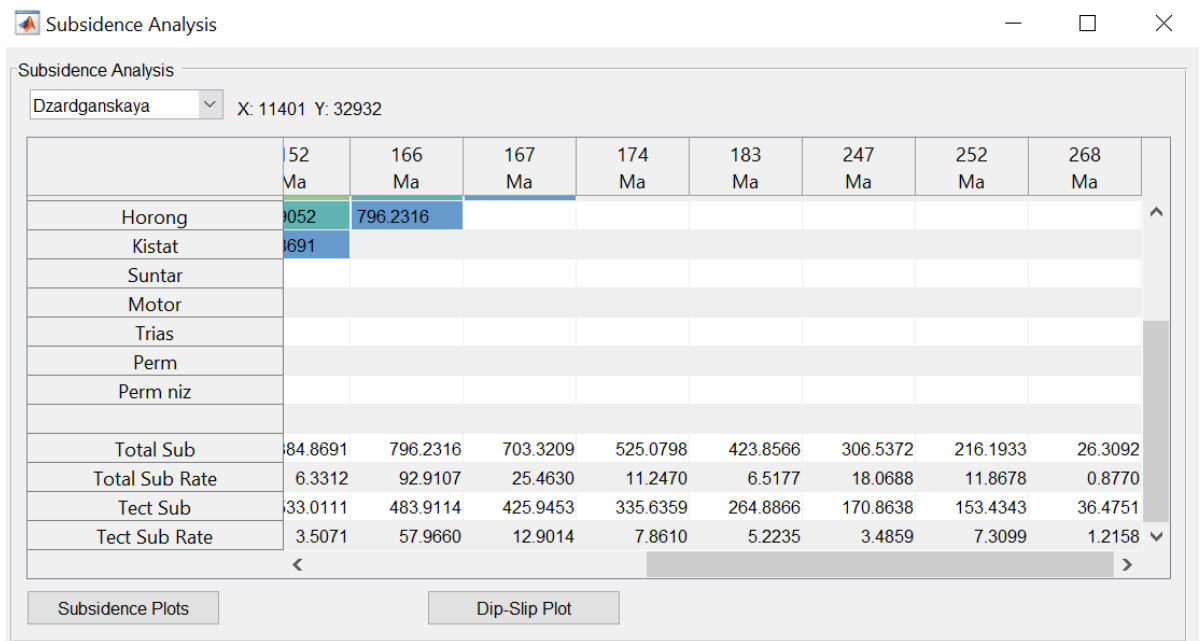


Рис. 19.

Заключение.

При изучении осадочных бассейнов анализ их прогибания обеспечивает большой вклад в понимание эволюции бассейна в геологическом времени и пространстве.

Методы количественной оценки применяются во многих бассейновых исследовательских проектах для оценки общего, тектонического и термического прогибания, а также используются в качестве предварительного условия для моделирования бассейнов.

Недавние исследования с применением методов визуализации для региональных особенностей и тенденций прогибаний доказали, что визуализация прогибания бассейна очень полезна для понимания условий образования и развития бассейна.

Также, история прогибания (burial history) и термическая история (thermal history) помогают определять нефтегазовый потенциал бассейна и оценить пористость и проницаемость коллекторов. Кривые истории прогибания возможно использовать для построения палеоструктурных карт на определенные временные срезы. В сочетании с информацией о термической зрелости это может быть мощным инструментом оценки сроков миграции нефти и вероятные пути ее миграции в ловушки.

Список литературы.

1. Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreeich Michael – Subsidence Analysis and Visualization For Sedimentary Basin Analysis and Modelling.
2. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). - М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2001, стр. 156.
3. Allen Philip A., Allen John R. – Basin Analysis Principles and Application to Petroleum Play Assessment-Wiley-Blackwell (2013), p. 327-340.
4. Berran Fabrizio and Carminati Eugenio – Subsidence history from a backstripping analysis of the Permo-Mesozoic succession of the Central Southern Alps (Northern Italy), Basin Research (2010)
5. Ershova V. B. – Subsidence history.
6. Levites Y. M. – Historical Geology With The Basics Of Paleontology.
7. Lee Eun Young, Novony Johannes, Wagreeich Michael – BasinVis 2.0, Guideline for Users.