

Th B 08

## Numerical Modeling of Salt Tectogenesis in the West of the Irkutsk Amphitheater

I.A. Gubin\* (IPGG SB RAS), T.V. Abramov (IPGG SB RAS), M.S. Kanakov (IPGG SB RAS) & B.V. Lunev (IPGG SB RAS)

### SUMMARY

---

In the article the geological structure of the Troicky-Mikhailovsky salt swell is analysed, the history of its geological development is restored, the full geological section of the study area with the depositional breaks is reconstructed. The duration and extent of erosion for each of the five depositional breaks since the late Vendian time is determined. Based on the model of regional tectonic movements and the speed of sedimentation mathematically calculated the evolution of the salts coming up through overlying more denser sediments on the basis of the solution of Rayleigh-Taylor fluctuation equation. The end result of the evolution is in good agreement with the observed structure of the Troicky-Mikhailovsky swell identified on seismic data. Based on the simulation results established that the growth of the swell began at the end of the Permian period and it was triggered by the regional tectonic movements, most actively manifested in the Triassic period. The formation of the swell is still ongoing, the compensation synclines that surrounds the swell with fill of Mesozoic sediments, have consedimentational genesis.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛЯНОГО ТЕКТОГЕНЕЗА НА ЗАПАДЕ ИРКУТСКОГО АМФИТЕАТРА**

*Абрамов Т.В. (ИНГГ СО РАН), Губин И.А.\* (ИНГГ СО РАН), Канаков М.С. (ИНГГ СО РАН), Лунёв Б.В. (ИНГГ СО РАН)*

На территории уникального кембрийского солеродного бассейна, расположенного в пределах Сибирской платформы, Троицко-Михайловский вал занимает его самую западную часть, протягиваясь на 200 км с юга на север от р. Кан до р. Тасеева. Троицко-Михайловский вал является одним из проявлений соляной тектоники, широко развитой в краевых частях Иркутского амфитеатра [Соляная..., 1973]. Ширина вала колеблется в пределах 7-10 км. Ось вала ундулирует, образуя локальные антиклинальные структуры: Канарийскую, Караульнинскую, Тынысскую и др.

В тектоническом отношении вал расположен вдоль западного борта Канско-Тасеевской впадины. Впадина выполнена в основном отложениями верхнего венда и кембрия, которые занимают 70-100% от общей толщины осадочного чехла (без рифея). Соленасыщенные интервалы отмечаются по всему разрезу нижнего и среднего кембрия в усольской, бельской, ангарской и литвинцевской свитах. Преимущественно терригенные отложения ордовика, верхнего девона, карбона, перми, юры, мела и неогена в апикальных частях вала полностью размыты, на крыльях вала и в погруженных частях чехла их суммарная мощность не превышает 1 км. Субплатформенный характер строения имеют рифейские отложения, судя по сейсмическим данным их мощность достигает 2,5-3 км. Они залегают на архей-нижнепротерозойском фундаменте, породы которого обнажаются западнее на Енисейском кряже.

Интерес к этой контрастной положительной структуре с амплитудой, достигающей более 1 км, был связан как с нефтепоисковыми работами, так и с поиском и разведкой залежей каменной и калийной солей. В южной части вала выявлено Канарийское месторождение каменной соли. Обнаружены повышенные концентрации калия в соленосных интервалах тынысской и троицкой пачках (верхи нижнего – низы среднего кембрия) [Минко, 1970].

Перспективы нефтегазоносности вала на сегодняшний день остаются невыясненными. Всего в пределах вала пробурено 11 глубоких скважин, а последнее бурение было закончено 40 лет назад на Южно-Солнечной площади. При испытании Тынысской опорной скважины (закончена бурением в 1960 г.) из нижнебельской подсвиты был получен приток газа с дебитом до 12 тыс. м<sup>3</sup>/сут. [Фукс, 1966]. Результаты испытания остальных скважин оказались отрицательными, однако не исключена возможность обнаружения нефтегазовых залежей в кембрии в связи с детализацией тектонического строения вала, изучением особенностей распределения в нем солей, обладающих высокими экранирующими свойствами, а также применяя современные методы проходки и испытания скважин. Задачи детализации современного тектонического строения Троицко-Михайловского вала, восстановления структуры подсолевых отложений, изучения перераспределения солей и карбонатных пород в процессе его роста, а также выяснения времени формирования вала как структуры благоприятной для аккумуляции залежей углеводородов можно решить с помощью численного моделирования соляного тектогенеза. Для этого необходимо реконструировать геологический разрез с учетом перерывов в осадконакоплении и восстановить историю геологического развития.

С использованием геологической карты района работ масштаба 1: 200 000, стратиграфических разбивок глубоких скважин, находящихся в зоне, не затронутой соляным тектогенезом (Абанская, Пушкинская, Почетская, Фединская площади), и привлекая данные о геологии и стратиграфии Присяно-Енисейской синеклизы из опубликованных источников [Государственная..., 2006 и др.] был реконструирован полный геологический разрез района работ (рис. 1). Всего в геологической истории формирования отложений, слагающих западную часть Присяно-Енисейской синеклизы, начиная с поздневендского времени (~545 млн. лет) можно выделить пять перерывов в осадконакоплении: раннемайский (509-505 млн. лет), позднеордовикско-среднедевонский (460-385 млн. лет), триасовый (265-200 млн. лет), палеогеновый (100-23 млн. лет) и неоген-четвертичный (13 млн. лет – настоящее время).

Начиная с позднего протерозоя территория Присяно-Енисейской синеклизы испытывает устойчивое прогибание, формируются молассовые формации тасеевской серии рифея, а с началом усольского времени устанавливается мелководный лагунный режим осадконакопления с формированием эвапоритовых и галогенных формаций общей мощностью до первых километров. Толщина соленасыщенных пластов варьирует от нескольких сантиметров до 75 м.

В районах, примыкающих к Енисейскому кряжу, зачастую отмечается опесчанивание галогенных отложений, которое связано с близостью источников сноса.



**Рисунок 1** Типовой разрез западной части Присаяно-Енисейской синеклизы с восстановленными мощностями.

Максимум трансгрессии приходится на ботомский век, когда формировались практически чистые карбонаты булайской свиты. В раннемайское время (E<sub>2</sub>) фиксируется перерыв в осадконакоплении, который охватывает большую часть Сибирской платформы.

С позднего кембрия начинается новый цикл осадконакопления, формируются мощные красноцветные терригенные толщи эвенкийской свиты континентального генезиса. Терригенное осадконакопление продолжается вплоть до конца среднего ордовика. Далее следует крупный перерыв в осадконакоплении, который подтверждается полным отсутствием в западной части Присаяно-Енисейской синеклизы и на прилегающих территориях отложений силура, нижнего и среднего девона.

В кембрийско-ордовикский период темп осадконакопления был самыми высокими за всю историю геологического развития. К середине ордовика галогенно-карбонатные толщи погрузились на глубину более 3 км, а последующее осадконакопление и погружение бассейна ещё на 700 м в позднем девоне, карбоне и перми спровоцировало начало соляного тектогенеза. В это время происходит накопление преимущественно терригенных толщ, характерных для внутриконтинентальных бассейнов.

С начала пермского времени в связи с отступлением моря на территории исследования устанавливается прибрежно-лагунный режим с формированием угленосных толщ.

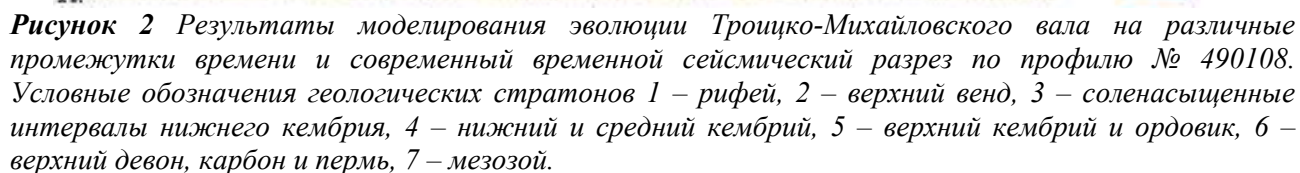
В триасовый перерыв осадконакопления происходил размыв ранее накопленных

пермских отложений. Начиная с юры территория вновь испытывает погружение, происходит формирование маломощных терригенных юрско-меловых отложений.

В конце позднего мела – начале палеогена вновь происходит общее воздымание территории, и вся она превращается в денудационную равнину. Происходит размыв отложений мезозоя и верхнего палеозоя. В олигоцене и раннем миоцене в результате дифференцированных тектонических движений по левобережью р. Ангары, вблизи долины Енисея формируются котловины, в которых отлагаются озерно-болотные, реже аллювиальные осадки. С конца миоцена по настоящее время происходит денудация ранее накопленных отложений, которая наиболее сильно проявляется в апикальных частях Троицко-Михайловского вала, где на дневную поверхность выходят отложения среднего кембрия.

На основании сделанной геологической реконструкции для изучаемой территории построена модель региональных тектонических движений и накопления осадков, использованная качестве исходных данных для моделирования происходящих на этом фоне наложенных локальных процессов соляной тектоники. Результаты моделирования и временной сейсмический разрез вкрест простирания Троицко-Михайловского вала представлены на рис. 2.





Всплывание солей сквозь вышележащие более плотные осадочные породы, как частный случай развития неустойчивости Рэлея-Тейлора, моделировалось трехмерным ползущим течением высоковязкой (порядка  $10^{20}$  Па · с) ньютоновской жидкости, вызываемым силой тяжести. Для расчета такого течения использовано известное аналитическое решение соответствующей краевой задачи в виде функции Грина [Лунёв, 1986], позволяющее рассчитывать течение как свертку этой функции с распределением плотности, без использования разностных схем. Свертка вычисляется с использованием быстрых алгоритмов (основанных на быстрых преобразованиях Фурье) [Абрамов, 2016], так что расчет одного шага по времени занимает порядка  $N \log N$  единиц времени, где  $N$  – число узлов расчетной сетки. Благодаря высокой эффективности алгоритма можно за приемлемое время проводить расчеты на больших 3D-сетках, что позволяет, варьируя исходные параметры модели (в пределах их известной точности), рассчитать достаточное количество вариантов эволюции, чтобы в итоге получить результат, воспроизводящий реально наблюдаемую геологическую структуру.

В данном случае, для предварительного изучения процессов соляного тектогенеза в западной части Присяно-Енисейской синеклизы, были проведены расчеты, с целью получить эволюцию, воспроизводящую структуру Троицко-Михайловского вала, выявленную по сейсмическому профилю № 490108. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, рост соляного вала начинается после накопления перекрывающих эвапоритовую толщу отложений верхнего кембрия и верхнего палеозоя. Суммарная мощность этих отложений составляет 1,5 – 2 км. Это как раз достаточная мощность для уплотнения терригенных пород эвенкийской свиты настолько, чтобы по отношению к эвапоритовой толще возникла инверсия плотности и создалась неустойчивость, делающая возможным развитие соляной тектоники. Региональные тектонические движения, имевшие место в послеордовикское время и вызвавшие заметные возмущения слоистой структуры, создали необходимые предпосылки для реализации неустойчивости и определили локализацию образующегося соляного вала. Дальнейший рост амплитуды вала проявился в раздвиге мощности эвапоритовой толщи в его пределах, локальном подъеме осадочных пород над ним и в конседиментационном развитии обрамляющих его компенсационных синклиналей. Эти эффекты проявляются, в частности, в увеличении мощности мезозойских отложений в компенсационных синклиналиях и эрозии этих отложений над валом, что хорошо видно как в результатах моделирования (рис.2.), так и на сейсмическом разрезе (рис. 2, внизу). К неогеновому времени (до которого проводилось моделирование) апикальная часть соляного вала подошла к дневной поверхности, что также согласуется с геологическими данными. Результирующая структура разреза в целом, также хорошо согласуется с данными сейсморазведки.

Можно заключить, что в результате моделирования, в целом, удалось воспроизвести современную структуру области и историю ее геологического развития по исследованному профилю, что делает осмысленным продолжение моделирования. В дальнейшем предполагается рассчитать 3D-модель соляного тектогенеза всей западной части Иркутского амфитеатра с детализацией в наиболее интересных районах и дополнить ее расчетами компонент сопутствующего напряженно-деформированного состояния, с целью углубленного исследования тектоники области и оценки возможных перспектив нефтегазоносности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00443.

## Литература

1. Абрамов Т.В. Быстрое численное решение краевых задач с известной функцией Грина через циклическую свертку // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 2. С. 3-11.
2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Объяснительная записка к листу О-46 / Зуев В.К. (отв. исп.), СПб.: ВСЕГЕИ, 2006 г. 331 с.
3. Лунёв Б.В. Изостазия как динамическое равновесие вязкой жидкости // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290, № 1. С. 72–76.
4. Минко Г.М. Новые данные по геологии и перспективам калиеносности Канско-Тасеевской впадины // Геология и калиеносность Сибирской платформы и других районов соленакопления СССР, М.: Наука. С. 7-30.
5. Соляная тектоника Сибирской платформы / Ю.А. Косыгин, Новосибирск: Наука, 1973 г. 162 с.
6. Фукс Б.А. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности западной части Канско-Тасеевской впадины // Геология и газонефтеносность Восточной Сибири, М.: Недра, 1966. С. 77-113.