

Определение подножия континентального склона на основе батиметрических данных¹

О. Н. Граничин, д. ф.-м. н.

Л. С. Гуревич,

Е. В. Степанов,

Санкт-Петербургский государственный университет

Oleg_granichin@mail.ru, gurevich.lev@gmail.com,

stepanov.yegor@gmail.com

В работе представлен алгоритм расчета доверительной полосы, в пределах которой с высокой долей вероятности лежит подножие континентального шельфа, в соответствии с требованиями Конвенции и Научно-технического руководства по границам континентального шельфа (Нью-Йорк, 1999). Особенностью задачи являются неполнота и неточность имеющейся информации, которые учитываются в алгоритме внесением рандомизации.

Ключевые слова: континентальный шельф, метод Монте-Карло, рандомизированный алгоритм.

1. Введение

Согласно Конвенции ООН по морскому праву от 1984 года, прибрежным государствам предоставляется право контроля над континентальным морским шельфом. Реализация требований Конвенции является одной из важнейших задач прибрежных государств. Построение границы континентального шельфа регламентируется положениями статьи 76 Конвенции и научно-техническим Руководством Комиссии по границам континентального шельфа. В них рассмотрены параметры внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) — подножие континентального склона (ПКС) и изобата 2500 м, а также методика их определения.

Подножие континентального склона определяется как точка максимального изменения уклона в его основании (в соответствии с положениями Конвенции). Результирующие точки границ континентального шельфа определяются на расстоянии 60 морских миль от ПКС. Реализация требований Конвенции состоит из двух связанных между собой задач — определение по результатам анализа батиметрических данных положения континентальной окраины и определение положения линии ПКС и изобаты 2500 м.

¹©О. Н. Граничин, Л. С. Гуревич, Е. В. Степанов, 2010

В пределах континентального шельфа ведется разработка месторождений нефти и газа, исследуется возможность добычи полезных ископаемых, находятся важнейшие рыбопромысловые районы мира. На шельф распространяются суверенные права прибрежного государства, без его прямого согласия никто не в праве вести разработку, разведку и добычу естественных богатств шельфа.

2. Подход к решению

Авторами было разработано семейство алгоритмов определения положения доверительной полосы, в пределах которой с задаваемой вероятностью (например, 95%) проходит линия подножия континентального склона (линия ПКС). Был сделан упор на неполноту и неточность имеющихся батиметрических данных.

Входными данными алгоритмов являются планшеты промеров глубины. Планшет представляет собой массив двумерных координат точек и глубин в эти точки: $\{x_i\}, \{y_i\}, \{z_i\}, i \in 1..N$. Для учета погрешности промеров по глубине ($\Delta_z = 1\%$ от абсолютной величины) по аналогии с общим подходом к моделированию по Монте-Карло вводится рандомизация данных по глубине, тем самым моделируется ансамбль возмущенных глубин $\{z_i\}$.

$$z_i \leftarrow z_i + z_i \cdot w_i,$$

где $w_i \in \mathcal{N}(0, 0.01)$ — нормально распределенная случайная величина с нулевым средним (математическим ожиданием) и дисперсией 0.01. Величина w_i генерируется случайно на каждом шаге (для каждого $z_i, i \in 1..N$).

Граница множества точек измерения $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^N$ образует невыпуклый многоугольник с вершинами в “граничных” точках. Измерения распределены неравномерно на планшете. Ввиду вводимой рандомизации, на выходе алгоритмов получается полоса, задаваемая двумя ограничивающими крайними ломаными линиями. Ломаные заданы как последовательность отрезков на планшете.

3. Описание экспериментов

Была проведена серия имитационных экспериментов, с возмущениями начальных данных, в результате которых был получен набор возможных поверхностей дна и линий ПКС. Эксперименты

имитировали независимое нормальное распределение погрешности измерения глубин в пределах одного процента от измеренной глубины. Рандомизация погрешности по координатам x и y не была промоделирована в силу отсутствия информации о природе ошибок. Проводилось 10-100 имитационных экспериментов для каждого планшета.

Таким образом были получены наборы ломаных линий, задающих ПКС при разных возмущениях входных данных. Самые крайние из этих линий образуют полосу, внутри которой и лежит реальная линия ПКС. Ширина этой полосы в разных участках планшета меняется, отображая устойчивость данных в том или ином регионе карты. На основании этого можно указать конкретные регионы, в которых глубинная информация требует большего уточнения.

4. Построение границы множества точек измерения

Во избежание погрешности, возникающей при интерполяции поверхности ввиду неравномерности распределения измерений, было предложено ограничить планшет невыпуклым многоугольником для поиска линии ПКС внутри него. Алгоритм основан на построении выпуклой оболочки точек $(\{x_i\}, \{y_i\})$ методом Грэхема (Graham scan).

Алгоритм использует LIFO-структуру (Last In–First Out, “Последний вошел–первый вышел”) — стек S , в котором хранятся точки (x_i, y_i) — кандидаты на “граничные” точки выпуклой оболочки (в конце работы алгоритма в стеке будут находиться точки, образующие выпуклую оболочку в порядке обхода). Также используются две вспомогательные процедуры: $\text{Top}(S)$ и $\text{Next_To_Top}(S)$, возвращающие соответственно самую верхнюю и следующую (вторую сверху) за самой верхней точки в стеке. $\text{Push}((x_i, y_i), S)$ и $\text{Pop}(S)$ — стандартные операции добавления точки в стек (наверх стека) и извлечение (удаление) самой верхней точки.

Далее, для уменьшения пустого места на границе планшета, производится уточнение полученного многоугольника заменой длинных ребер на более короткие. В результате получаем невыпуклый многоугольник, ограничивающий область измерений (см. рис. 1).

Алгоритм 1 Алгоритм Грэхема.

- 1: Пусть (x_0, y_0) — точка из множества измерений с минимальной координатой y или самая левая из таких точек при наличии совпадений
 - 2: Пусть $[(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)]$ — остальные точки этого множества, отсортированные в порядке возрастания полярного угла, измеряемого против часовой стрелки относительно точки (x_0, y_0) (если полярные углы нескольких точек совпадают, то из множества удаляются все эти точки кроме одной, самой дальней от точки (x_0, y_0))
 - 3: Push((x_0, y_0) , S)
 - 4: Push((x_1, y_1) , S)
 - 5: Push((x_2, y_2) , S)
 - 6: **for** $i \leftarrow 3$ to N **do**
 - 7: **while** (угол, образованный точками Next_To_Top(S), Top(S) и (x_i, y_i) , образует не левый поворот) **do**
 - 8: Pop(S)
 - 9: Push((x_i, y_i) , S)
 - 10: return S
-

5. Аппроксимация поверхности дна по нерегулярной сетке

Были исследованы алгоритмы интерполяции в трехмерном пространстве. Проводились эксперименты с квадратичными и кубическими сплайнами а также с линейной интерполяцией. Сетка данных такого типа используется, например, при определении линии подножия континентального склона атлантического побережья США [6]. В результате серии экспериментов была выбрана линейная интерполяция через триангуляции, так как она обеспечивала наилучшую устойчивость при измерении линии ПКС под действием пробного возмущения.

6. Построение поверхности нормы матрицы второй производной от глубины

На основе полученной алгоритмом интерполяции поверхности затем строится поверхность вторых производных в направлении

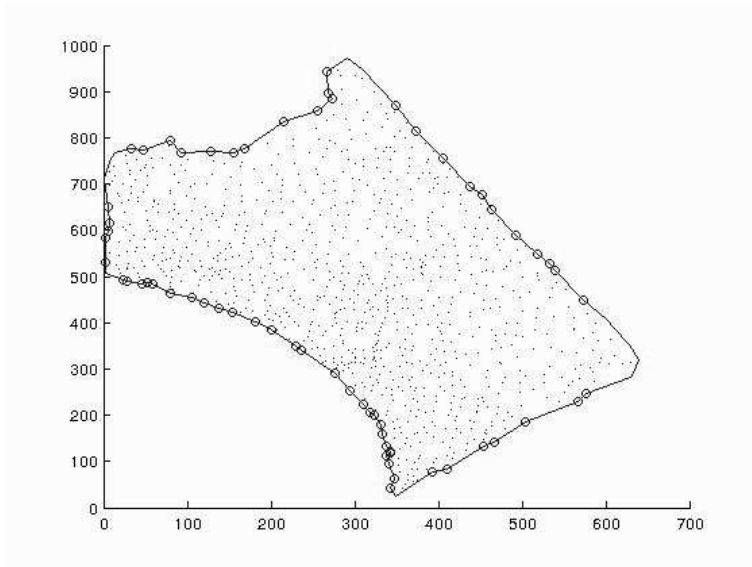


Рис. 1: Граница множества точек измерения.

градиента, соответствующая максимальному изменению уклона основания в данной точке. Такая поверхность используется в частности для определения линии ПКС атлантического побережья США. Данная поверхность была построена для каждого эксперимента.

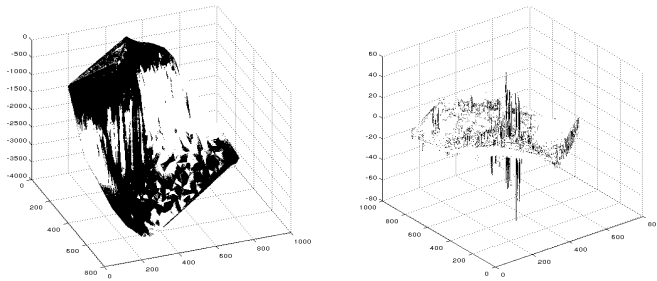


Рис. 2: Интерполяция поверхности по замерам глубин и поверхность вторых производных в направлении градиента.

7. Аппроксимация линии ПКС

На основе модели поверхности вторых производных, вычисляется линия ПКС. Для этого разработан оригинальный алгоритм. По каждому планшету вычисляется величина барьера градиента, основанная на дисперсии градиента по всему планшету.

Алгоритм начинает работу с точки, лежащей внутри границы планшета на некотором расстоянии от нее. После определения самой высокой точки на поле вторых производных для текущего профиля, алгоритм переходит к следующему профилю и находит для него самую высокую точку в смещенной окрестности предыдущей. Выбранные точки, высота которых оказалась больше указанного барьера, образуют последовательность концов отрезков ломаной, задающей аппроксимацию линии ПКС.

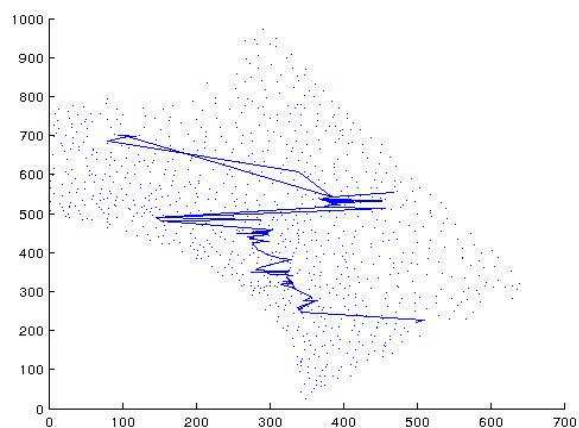


Рис. 3: Аппроксимация линии ПКС.

Список литературы

- [1] Фридман Б.С. Методика определения подножия континентального склона в Арктическом бассейне для реализации требова-

ний Конвенции ООН по морскому праву // Геодезия и картография. 2007. Вып. 3. С. 39–48.

- [2] *Нарышкин Г.Д., Комарицын А.А., Каврайский А.В., Нестеров Н.А., Опарин А.Б., Фридман Б.С.* Геоморфологические аспекты внешней границы континентального шельфа России в Арктике. — СПб.: ГУНиО МО РФ. 2005. 60 с.
- [3] Конвенция ООН по Морскому Праву. — Нью-Йорк. 1984.
- [4] Научно-техническое руководство Комиссии по границам континентального шельфа. Пятая сессия. — Нью-Йорк, 3-14 мая 1999 г. 90 с.
- [5] *Корман Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы. Построение и анализ. Второе издание. — М.: Издательский дом “Вильямс”. 2005. 1296 с.
- [6] *Bennett J.* Mapping the Foot of the Continental Slope with Spline-Smoothed Data Using the Second Derivative in the Gradient Direction. — International Hydrographic Review, September 1998.