

*А. В. Мышерин*

## **АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ЗОН МИРОВОГО ОКЕАНА, ОБЛАДАЮЩИХ ПОВЫШЕННОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ**

*Исследуется вопрос применения данных дистанционного зондирования для выделения зон Мирового океана, обладающих повышенной биологической продуктивностью. Представлен алгоритм, позволяющий выделять такие зоны в соответствии с данными промысловой статистики. Рассмотрен метод минимальной кривизны с натяжением для решения задачи географической привязки данных к требуемой сетке.*

*The question of the application of remote sensing data to choose areas of the great oceans with increased biological productivity is considered. Submitted algorithm allows sharing this areas in accordance with the data of fisheries statistics. The method of minimum curvature in tension for the solution of problems of gridding data to required grid is considered.*

**Ключевые слова:** промысловая океанология, приближение функций, интерполирование, данные дистанционного зондирования, алгоритм географической привязки.

**Key words:** fishery oceanology, approximation of functions, interpolation, remote sensing data, Gridding algorithm.



Изучение влияния среды обитания на воспроизводство, распределение и поведение скоплений промысловых объектов Мирового океана — одна из основных задач современной промысловой океанологии. Ее решение связано с проектированием, внедрением и использованием интеллектуальных компьютерных систем с соответствующим программным обеспечением. Регулярные спутниковые измерения параметров подстилающей поверхности и математические методы их обработки позволяют определять потенциальные места скопления рыбы и могут служить основой для прогностических расчетов условий промысла [1]. В Атлантическом научно-исследовательском институте рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО) в лаборатории промысловой океанологии отдела океанических биоресурсов разработана и внедрена автоматизированная система [2] использования спутниковой гидрометеорологической информации для нужд рыболовного промысла. Система основана на применении данных дистанционного зондирования океана. Известно, что распределения промысловых скоплений рыб приурочены к термическим фронтальным зонам. Поэтому косвенный индикатор возможного пространственного распределения промыслового объекта — температура поверхности океана (ТПО). Однако часто бывает, когда при схожих термических условиях наблюдается полное отсутствие скоплений. Исследования показали, что необходимо учитывать также и кормовой фактор среды. При всем этом нужно иметь в виду, что океан является динамической системой и распределения любых параметров связаны с течениями, в основном определяемыми динамической топографией поверхности, структура которой также может фиксироваться дистанционно [3]. По данным распределения уровней поверхности океана (УПО) рассчитывается векторное поле течений, по ним можно выявить различные вихревые образования циклонического и антициклонического характера, которые, в свою очередь, позволяют определять зоны подъема и опускания океанических водных масс, связанных с генерацией биологически активных образований. Если из вышесказанных данных выделить оптимальные параметры, значимые для промысла, то ясно, что все они взаимосвязаны и могут быть с успехом использованы для прогностических целей.

В АтлантНИРО разработаны программные модули прогнозирования пространственного распределения факторов среды [4]. Рассмотрим их алгоритмы работы, позволяющие определять оптимальные диапазоны характеристик для конкретных промысловых объектов [5]. Для выделения требуемых высокоградиентных зон необходимы исходные данные:

- 1) дистанционного спутникового зондирования (ТПО, УПО, их градиенты, хлорофилл) по различным районам океана, получаемые из системы оперативного спутникового мониторинга;
- 2) промысловой статистики;
- 3) прогностических распределений абиотических факторов Мирового океана с заданным упреждением, позволяющие получить программный модуль прогнозирования распределения геофизических параметров.



Программный модуль выполняет следующие шаги:

1. Определяет условия вылова по каждому из заданных параметров. Проводит отбор точек вылова для каждого параметра и определяет границы его изменения. Для каждой точки, в которой присутствуют положительные данные о вылове, задает параметр. Исходные файлы из формата Surfer grid file экстраполирует в точки, где зафиксирован вылов. Каждую поверхность интерполирует методом минимальной кривизны с натяжением [6] и находит значения функции в заданных точках. В итоговом файле сохраняет верхние и нижние границы для каждого параметра.

2. Исходные данные, имеющие различное пространственное разрешение, приводит к единой сетке. Выбор сетки производит оператор. Исходные файлы из формата Surfer grid file экстраполирует в узлы сетки. Каждую поверхность интерполирует методом минимальной кривизны с натяжением и находит значения функции в узлах сетки. В результирующий файл записывает все выбранные параметры.

3. Выбирает географические области с благоприятными для лова условиями по совокупности параметров. Использует файл, созданный на втором шаге. Параметры можно варьировать. Для выделенных зон приводит данные о выловах. По выделенным высокоградиентным зонам при проведении регрессионного анализа возможно получение карт наиболее вероятного распределения промысловых объектов.

Так как все исходные данные, кроме данных о выловах, суть поверхности, в ходе первого и второго шагов возникает задача географической привязки их к единой сетке. Рассмотрим метод минимальной кривизны с натяжением, описанный в работе [6], который используют норму

$$C = \iint (\nabla^2 z)^2 dx dy. \quad (1)$$

Это уравнение является допустимым приближением для полной (гауссовой) кривизны  $z$ , когда  $|\nabla z|$  мало. В работе [5] показано, что минимизация уравнения (1) приводит к дифференциальному уравнению

$$\nabla^2 (\nabla^2 z) = \sum_i f_i \delta(x - x_i, y - y_i), \quad (2)$$

где  $(x_i, y_i, z_i)$  – требуемые данные. Функции  $f_i$  должны быть выбраны таким образом, чтобы  $z \rightarrow z_i$  когда  $(x, y) \rightarrow (x_i, y_i)$ . Граничные условия

$$\frac{\partial^2 z}{\partial n^2} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial n} (\nabla^2 z) = 0 \quad (4)$$

вдоль границ, где  $\partial/\partial n$  обозначена производная по нормали к границе, и

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0 \quad (5)$$

в углах. С условиями свободного края (3)–(5) у (2) есть единственное решение с непрерывными вторыми производными, названное *естественным бикубическим сплайном*. Название произошло из аналогии со сгибанием упругой



гой пластины. Маленькие смещения  $z$  тонкой упругой пластины постоянной жесткости к изгибу  $D$  согласно вертикальному нормальному напряжению  $q$  и постоянным горизонтальным силам на единицу вертикальной длины  $T_{xx}$ ,  $T_{xy}$ , и  $T_{yy}$  приблизительно удовлетворяют уравнению

$$D\nabla^2(\nabla^2 z) - \left[ T_{xx} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + 2T_{xy} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + T_{yy} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right] = q. \quad (6)$$

Уравнение географической привязки минимальной кривизны (2) является частным случаем (6), когда горизонтальные силы равны нулю, граничные условия отражают нулевой сгибающий момент на границах (3), нулевое вертикальное напряжение при сдвиге на границах (4) и нулевой скручивающий момент в углах (5). Полный запас энергии упругой деформации в согнутой пластине приблизительно пропорционален искривлению (1). Из всех дважды дифференцируемых поверхностей, интерполирующих данные, поверхность минимальной кривизны хранит наименьшее количество энергии напряжения.

Пусть  $T_{xx} = T_{yy} = T$  и  $T_{xy} = 0$ . Тогда (6) примет вид  $D\nabla^2(\nabla^2 z) - T\nabla^2 z = q$ . Когда  $T = 0$ , уравнение эквивалентно (2); но для произвольно большого  $T$  решение зависит от второго члена.  $T$  представлено в единицах силы на длину, перепишем уравнение, чтобы привести его в соответствие с  $D$  и  $q$ :

$$(1 - T_l)\nabla^2(\nabla^2 z) - T_l\nabla^2 z = \sum_i f_i \delta(x - x_i, y - y_i). \quad (7)$$

Здесь  $T_l$  — параметр натяжения, индекс  $l$  указывает на внутреннюю напряженность. На границах натяжение определяется независимо от  $T_l$ . Будем менять  $T_l$  от 0 до 1. По аналогии с упругостью,  $T_l = 1$  представляет бесконечное натяжение. Важное свойство этого решения: оно не имеет локальных максимумов или минимумов, за исключением значений в требуемых точках (это следует из теоремы о свойстве среднего для гармонических функций). Для любого  $T_l$  в отрезке  $0 \leq T_l < 1$  уравнение (7) дает решение с непрерывной кривизной, хотя и не минимизирует (1), кроме  $T_l = 0$ .

Определим граничную напряженность условиями (4) и (5), но заменим (3) на  $(1 - T_B) \frac{\partial^2 z}{\partial n^2} + T_B \frac{\partial z}{\partial n} = 0$ , где  $T_B$  — параметр натяжения для границы, также варьируемый от 0 до 1. Уравнение (2) решается методом конечных разностей. В работе [6] показано, как модифицировать алгоритм для получения решения уравнения (7). Приведенный метод стал де-факто стандартом картографической привязки поверхности к требуемой сетке для большинства современных геоинформационных систем.

Результатом проведения комплексного анализа являются оперативные (или прогностические) карты распределения оптимальных значений выбранных параметров среды для конкретных промышленных объектов.

### Список литературы

1. Захаров Л. А. Введение в промышленную океанологию : учеб. пособие. Калининград, 1998.



2. Полищук И. А., Бурькин С. Н., Архипов В. И. и др. Автоматизированная система мониторинга океанических условий в отдаленных районах промысла с использованием спутникового зондирования поверхности океана // Вопросы промысловой океанологии. М., 2009. Вып. 6, № 2. С. 173–182.

3. Сирота А. М., Лебедев С. А., Тимохин Е. Н. и др. Использование спутниковой альтиметрии для диагноза промыслово-океанологических условий в Атлантическом и юго-восточной части Тихого океанов. Калининград, 2004.

4. Архипов В. И., Полищук И. А., Бурькин С. Н. и др. Технология прогнозирования пространственного распределения геофизических параметров // Материалы XV конференции по промысловой океанологии, посвященной 150-летию со дня рождения академика Н.М. Книповича (Светлогорск, Калининградская обл.). Калининград, 2011. С. 188–189.

5. Архипов В. И., Бурькин С. Н., Маслянкин Г. Е. и др. Автоматизация определения вероятного распределения промысловых рыб на основе комплексного анализа и прогноза параметров // Материалы XIII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2013). М., 2013. Т. 2. С. 181–184.

6. Smith W. H. F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension // Geophysics. 1990. Vol. 55, No. 3. P. 293–305.

#### Об авторе

Александр Владиславич Мышерин – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: mysherin@list.ru

#### About the author

Alexandr Mysherin – high instructor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: mysherin@list.ru