

Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря.
Материалы IX международной конференции
11-14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия
Петрозаводск, 2005. С. 165-171.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ПЯТЬ ЛЕТ: МЕТОДЫ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А.А. КОРОСОВ, Д.В. ПОЗДНЯКОВ

Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург

Разработан новый алгоритм одновременного восстановления таких параметров качества воды как хлорофилл фитопланктона, минеральная взвесь и растворенное органическое вещество. Алгоритм применен для изучения пространственной и временной динамики качества воды и продуктивности в Онежском заливе Белого моря. Анализ результатов обеспечил значительно более глубокое понимание разнообразных внутриводных процессов в Белое море, на которые влияет целый спектр внешних факторов.

A.A. Korosov & D.V. Pozdnyakov. Evaluation of the current state and modification trends of the White Sea primary production from remote sensing data for the last five years: methods and pilot results // The study, sustainable use and conservation of natural resources of the White Sea. Proceedings of the IXth International Conference, October, 11-14, 2004. Petrozavodsk, Karelia, Russia. Petrozavodsk, 2005. P. 165-171.

A new satellite-nonspecific algorithm for a simultaneous retrieval of content of such water quality proxies as phytoplankton chlorophyll, suspended minerals and dissolved organics has been developed and applied for the surveillance of spatial and temporal dynamics in the water quality and productivity in Onega Bay of the White Sea. As a result, the properly analyzed data provided a considerably more adequate insight into a variety of in-water processes inherent in such semi-enclosed water bodies as the White Sea that experience a spectrum of impacts generated by multiple external forces.

Исследование Белого моря средствами дистанционного зондирования имеет преимущество перед контактными методами измерений, поскольку космические снимки предоставляют моментальную информацию о состоянии всей поверхности и приповерхностного слоя моря. Как известно (Bukata et al., 1995), оптические свойства природных вод таковы, что электромагнитная радиация лишь в видимом диапазоне спектра способна существенно проникать в глубь водного столба. При этом фотоны взаимодействуют с водной средой, что приводит к изменениям в спектральном распределении радиационного потока. Рассеяние фотонов в природных водах на оптических неоднородностях приводит к тому, что часть проникающей радиации оказывается перенаправленной назад к разделу вода-атмосфера. Рассеянный назад световой поток несет дистанционному наблюдателю информацию об оптических свойствах водного столба. Таким образом, выходящий из воды свет и, следовательно, цвет воды являются сверткой всех произошедших взаимодействий световых фотонов с водной средой (Pozdnyakov, Grassl, 2003). Это естественным образом объясняет исключительную роль спутниковых датчиков, работающих в видимом спектральном диапазоне, при исследовании *внутриводных* параметров и процессов (Kondratyev et al., 1999).

В случае исследования *открытых* морских акваторий построение алгоритмов восстановления искомого параметра(ов) по спутниковым данным

(например, с SeaWiFS, MODIS, MERIS) довольно успешно осуществляется с применением достаточно простых полуэмпирических био-оптических алгоритмов (O'Reilly et al., 1998; Ackleson, 2001). Однако, в случае вод прибрежной зоны и внутренних водоемов, ситуация оказывается существенно более сложной: такие воды (названные водами типа два (Morel, Prieur, 1977) содержат во *взаимно-некоррелированных* и нередко *значительных* количествах такие компоненты как фитопланктон, минеральная взвесь (*мв*) и растворенное органическое вещество (*ров*). Таким образом, оптические свойства вод типа два уже не определяются исключительно содержанием фитопланктона/хлорофилла (*хл*), но в значительной мере формируются оптическим влиянием *мв* и *ров*.

Это означает, что при зондировании вод типа два невозможно восстановление содержания лишь одного компонента: необходим алгоритм, способный одновременно восстанавливать концентрации основных цветообразующих компонент (ЦОК), к которым в первую очередь относятся *хл*, *мв* и *ров* (Kondratyev, 1999). Последние традиционно ассоциируются с параметрами качества воды (ПКВ), хотя в действительности номенклатура таковых значительно более обширная (Ладожское озеро, 1992).

Описание алгоритма восстановления ПКВ

Ранее нами было показано (Pozdnyakov, Lyaskovsky, 1999), что в условиях полного отсутст-

вия шума и при наличии адекватной гидрооптической модели метод многомерной оптимизации (процедура Левенберга-Марквардта) может успешно использоваться в качестве алгоритма восстановления ЦОК в случае вод второго типа. Нами был разработан усовершенствованный био-оптический алгоритм восстановления концентраций ЦОК, который объединяет процедуру Левенберга – Марквардта, и нейронные сетевые технологии (Поздняков и др., 2004). В этой статье мы проиллюстрируем применение алгоритма на примере анализа многолетних серий космических снимков Белого моря.

Начнем с краткого описания основных принципов, заложенных в основу алгоритма. Их более подробное описание приведено, в частности, в следующих работах (Bukata, Jerome, Bruton, 1985a; Кондратьев, Поздняков, Исаков, 1990).

Процедура многомерной оптимизации. Если $R_{rsw}(\lambda, C, a, b_b)$ – коэффициент дистанционного зондирования непосредственно под поверхностью воды (по определению R_{rsw} – яркость восходящего света непосредственно под поверхностью воды, нормированная на исходящую освещенность, создаваемую падающим светом на том же уровне (Jerome, Bukata, Miller, 1996), рассчитанный с использованием какой-либо из известных параметризаций, а $\{S_j\}$ – значение R_{rsw} , полученное из измерений *in situ*, тогда величина невязки g_j может быть мерой близости измеренного и рассчитанного R_{rsw} . Величина невязки может быть рассчитана одним из следующих способов:

$$g_j = [S_j - R_{rsw}] / S_j; \quad (1)$$

$$g_j = [S_j - R_{rsw}] / R_{rsw}; \quad (2)$$

$$g_j = [S_j - R_{rsw}]; \quad (3)$$

(здесь j – длина волны λ , при которой производились гидро-оптические измерения; a , b_b результирующее поглощение и рассеяние назад в водном столбе, C – вектор концентрации ЦОК: $C(C_{xl}, C_{mv}, C_{rov})$).

По методу наименьших квадратов, величина C может быть определена путем минимизации функции невязки:

$$f(C) = \sum_j g_j^2(C) \quad (4)$$

Итерационные поиски абсолютного минимума функции $f(C)$ могут быть выполнены с использованием процедуры Левенберга-Марквардта (Л-М), которая, являясь разновидностью классического метода Ньютона-Гаусса, обеспечивает более скорую сходимость итерационной процедуры. При расчете оптимального вектора концентрации C , при котором достигается абсолютный минимум функции невязки $f(C)$ применяется следующая итерационная формула:

$$C_{k+1} = C_k + \lambda_k (F_k' F_k + \mu_k D_k)^{-1} F_k' \left(1 - \frac{R(C_k)}{S_k} \right) \quad (5)$$

где k – шаг итерации, $D_k = \text{diag}(F_k' F_k)$ – диагональная матрица, главная диагональ которой состоит из элементов $F_k' F_k$,

$$F(C) = \left| \frac{\partial R_j}{\partial C_j} \right| - \text{матрица } n \times m \text{ (} n - \text{число длин}$$

волн, на которых производились измерения S , m – размерность вектора концентраций C), $F(C)$ – транспонированная матрица $F(C)$, μ_k – направление минимизации, λ – длина шага процедуры оптимизации.

В ходе итерационного спуска к глобальному минимуму функции невязки, процедура может завестись в некий локальный минимум $f(C)$. С целью избежать указанной трудности, возможен выбор целой серии произвольных стартовых значения C_0 , для каждого из которых метод многомерной оптимизации отыскивает минимум функции невязки. Последующее сравнение этих минимумов позволяет идентифицировать такой вектор концентраций C , который привел к минимальному из полученных минимальных значений функции невязки. Это значение и принимается как окончательное решение задачи. При этом следует иметь в виду, что число начальных векторов концентраций C_0 не должно быть слишком большим, поскольку расчетное время поиска решения обратной задачи увеличивается пропорционально их количеству.

Однако, и при таком подходе не обеспечивается гарантия того, что запущенная итерационная процедура окажется сходящейся, или значения C будут физически реалистичными. Эта сложность может быть обойдена, если задать априорные ограничения на значения концентраций каждой из искомым ЦОК $-C_i$:

$$C_{i \min} \leq C_i \leq C_{i \max}, \quad (6)$$

где подстрочный индекс i обозначает i тую компоненту зондируемой водной среды.

Нейронно-сетевой (НС) алгоритм. Из существующих типов искусственных нейронных цепей наиболее частое применение для целей дистанционного зондирования нашли многослойные перцептроны (МП) (Stuttgart Neural Network Simulator, 1995; Atkinson, Tatnall, 1997). В общем случае МП состоит из трех слоев: входной, внутренний или промежуточный и выходной. Входной слой содержит нейроны, отражающие свойства входного параметра (в нашем случае это могут быть спектральные значения коэффициента R_{rsw}). Выходной слой содержит нейроны, число которых соответствует числу искомым параметров (в нашем случае это *xl*, *mv* и *rov*). Число нейронов во внутреннем слое подбирается экспериментально и зависит от характера связи между входными и выходными параметрами. Каждый нейрон в нейронной цепи связывается со всеми

нейронами предыдущего и последующего слоя посредством придания передаточной функции индивидуальным весам.

Каждый принимающий нейрон суммирует взвешенные сигналы, поступающие к нему от нейронов предыдущего слоя:

$$net_j = \sum_{i=1}^N \omega_{ji} o_i, \quad (7)$$

где ω_{ji} - вес связи между нейроном i и нейроном j , а o_i - выходной сигнал нейрона i .

Созданная таким образом нейронная цепь подлжет тренировке с тем, чтобы придать ей способность к генерализации, т.е. способность к интерполяции и корректного решения обратной задачи с входными данными, отличными от тех, что составляли пул тренировочных данных. Натренированная цепь затем тестируется с использованием дополнительного пула данных входных и выходных значений параметров, не вошедших в тренировочный пул.

Краткое описание работы разработанного нами операционного алгоритма приведено ниже.

После предварительной обработки, включающей и атмосферную коррекцию (Ruddick, Ovidio, Rijkeboer, 2000), для каждого пикселя многоспектрального спутникового изображения рассчитываются спектральные значения R_{rsw} (Pozdnyakov et al., 2003), используя из сопровождающего снимок протокола значения нормализованной яркости света, выходящего из воды ($L_w(\lambda)$), внеатмосферного солнечного потока (F_0) и зенитного угла Солнца (θ_0).

Рассчитанные спектральные распределения R_{rsw} для каждого пикселя поступают на вход НС-алгоритма (НС). На следующем этапе, из полученного значения вектора концентраций C формируется диапазон стартовых значений C_0 .

Из созданного таким образом пула стартовых векторов C_0 ЦОК, случайным образом происходит выборка стартовых значений C_{0i} , которые поступают на вход ЛМ алгоритма. На выходе ЛМ алгоритма мы получаем окончательные значения искоемых концентраций chl , mv и rov .

Функционирование как НС, так и ЛМ алгоритмов обеспечивается использованием соответствующей исследуемому водоему гидрооптической модели (табулированные спектральные значения сечений поглощения и обратного рассеяния chl , mv и rov , а также воды как таковой), и параметрического соотношения между $R_{rsw}(\lambda)$ и результирующими коэффициентами поглощения a и рассеяния назад b_b водного столба (Jerome, Bukata, Miller, 1996).

На языке C++ нами была разработана программа, реализующая био-оптический алгоритм, в которую были добавлены блоки чтения и геометриче-

ской коррекции космических снимков, и визуализации полученных результатов. Программа была названа «HDF2CPA».

Обработка космических снимков Белого моря

Для анализа первичной продуктивности Белого моря были использованы данные со спутника SeaWiFS, который поставляет космические снимки в течение 8 лет, начиная с 1997 г., а также с его усовершенствованного аналога спутника MODIS, который функционирует с 2002 г. Снимок представляет собой многоспектральное изображение, каждый канал которого соответствует определенной спектральной полосе, расположенной в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне. Снимки хранятся в формате HDF, поэтому для оперативного использования разработанной нами программы, было необходимо включить в нее специальный модуль для чтения файлов этого формата.

Поскольку космические снимки NASA предоставляются бесплатно, их доступное количество ограничено лишь частотой пролета спутника над исследуемым водным объектом, а также количеством безоблачных дней, во время которых производилась съемка. Сам доступ к космическим снимкам осуществляется через веб-узел NASA, и включает в себя фазы отбора и загрузки снимков, являясь, таким образом, длительной и трудоемкой процедурой. Учитывая это, для загрузки и анализа мы выбрали только 1999, 2000 и 2004 гг., поскольку количество безоблачных дней, в которые проводилась съемка со спутника, в эти годы больше, чем в другие. Всего было загружено 11 космических снимков за летний период 1999 г., 17 снимков, сделанных в 2000 г., и 49 снимков за 2004 г. Летний период был выбран, поскольку с мая по сентябрь Белое море свободно ото льда и вода в нем достаточно прогрета и богата биогенами, что необходимо для развития фитопланктона.

Полученные за разные года и сезоны, все космические снимки были обработаны с помощью нашей программы. В результате, для каждого снимка мы получили пространственные распределения концентраций хлорофилла, минеральной взвеси и растворенного органического вещества. С целью провести сравнение среднегодовых значений, а также для визуализации полученных результатов мы рассчитали средние значения chl , mv и rov за каждый год. Результаты наших экспериментов представлены на рисунках 1–4.

На рис. 1. в качестве примера приведены пространственные распределения концентраций chl , mv и rov . Эти распределения построены по средним значениям концентраций полученных по всем снимкам 2004 г. По рисункам видно, что наиболее активно фитопланктон развивается в районе Соловецких островов, а также в районе границы Белого и Баренцева морей. Максимальные концентрации минеральной взвеси наблюдаются у берегов, в эстуариях

рек, которые выносят его со своими водами, а также и на мелководьях, где концентрация минеральной взвеси может существенно возрасть в результате ресуспензии донных отложений штормовой деятельностью. Распределение концентраций аллохтонной компоненты растворенной органики также тесно связано с речным стоком.

На рис. 2 приведены распределения средних значений *хл* за 1999, 2000 и 2004 гг., которые были получены аналогичным методом. На рис. 3 приведены гистограммы распределения средних концентраций *хл* в верхнем слое Белого моря за разные годы, которые были получены по данным, использованным для построения пространственных распределе-

ний *хл* (Рис. 2). Эти данные, на наш взгляд, свидетельствуют об отсутствии устойчивой тенденции изменения концентрации хлорофилла в Белом море за анализировавшиеся годы. Таким образом, первичная продуктивность в этом морском бассейне остается в последние годы на неизменном уровне.

На рис. 4 приведены распределения средних значений *хл* за разные месяцы 2004 г. На этих рисунках можно проследить динамику развития фитопланктона и выделить два пика цветения в районе Соловецких островов: в мае и в августе. Наряду с этим активность цветения фитопланктона на границе с Баренцевым морем остается постоянной в течение всего лета.

А

Б

В

Рис. 1. Пространственные распределения средних значений концентраций (А) *хл* (шкала от 0 до 25 мкг/л), (Б) *мв* (шкала от 0 до 5 мг/л), (В) *пов* (шкала от 0 до 15 мгС/л), восстановленных по космическим снимкам, полученным в 2004 году

А

Б

В

Рис. 2. Пространственные распределения средних значений концентраций хл (шкала от 0 до 25 мкг/л), восстановленных по космическим снимкам, полученным в (А) 1999 г., (Б) 2000 г., (В) 2004 г.

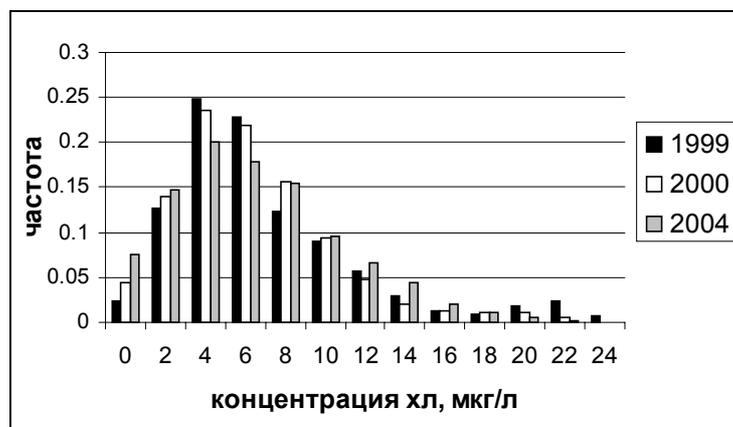


Рис. 3. Сравнение распределений концентрации хл полученных по космическим снимкам, сделанным в 1999, 2000 и 2004 годах

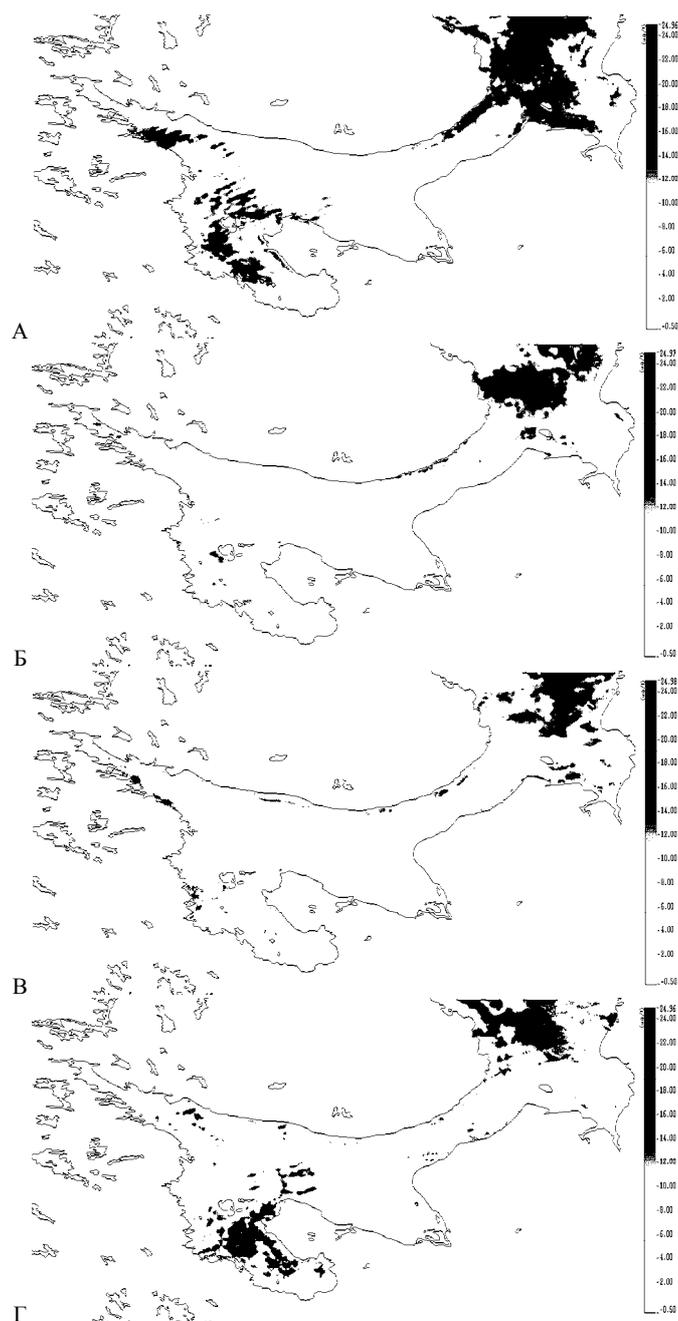


Рис. 4. Пространственные распределения средних значений концентраций хл (шкала от 0 до 25 мкг/л), восстановленных по космическим снимкам, полученным в (А) мае 2004 г., (Б) июне 2004 г., (В) июле 2004 г., (Г) августе 2004 г.

Заключение

Представленные результаты исследования Белого моря средствами оптического дистанционного зондирования показывают, что этот метод может с успехом применяться как для изучения биотических, так и абиотических процессов, протекающих в Белом море. Следует, однако, помнить, что существуют некоторые факторы, ограничивающие точность абсолютной оценки содержания в природных водоемах хл, мв и ров с помощью разработанного биооптического алгоритма. В частности речь идет о

низкой точности входных данных, обусловленной несовершенной процедурой атмосферной коррекции космических снимков.

В будущем планируется в качестве входных данных использовать снимки с европейского спутника MERIS/ENVISAT, которые обладают большим спектральным разрешением. Кроме того, ожидается, что усилия Европейского Космического Агенства (ESA) по разработке более точной атмосферной коррекции снимков увенчаются успехом.

Литература

- Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В., Исаков В.Ю. Радиационно-гидрооптические эксперименты на озерах. Л.: Наука. 1990. 115 с.
- Ладожское озеро. С.-Петербург: Наука, 1992. 325 с.
- Поздняков Д.В., Коросов А.В., Петтерссон Л., Ионов В.В. Новый операционный алгоритм восстановления качества природных вод по данным спутникового зондирования // Исслед. Земли из Космоса, 2004. № 3. P. 12-18.
- Ackleson S. Ocean optics research at the start of the 21st century // Oceanography, 2001. № 14. P. 5-8.
- Atkinson P.M., Tatnall A.R.T. Neural networks in remote sensing // Int. J. Rem. Sens., 1997. V. 18. № 4. P. 699-709.
- Bukata R.P., Jerome J.H., Bruton J.E. Application of Direct Measurements of Optical Parameters to the Estimation of Lake Water Quality Indicators // Environment Canada Inland Waters Directorate Scientific Series. 1985a. № 140. 35 p.
- Bukata R.P., Jerome J. H., Kondratyev K.Ya., Pozdnyakov D.V. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. Boca Raton e.a.: CRC Press.1995. 360 p.
- Jerome J.H., Bukata R.P., Miller J.R. Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural waters // Int. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. № 1. P. 3115-3155.
- Kondratyev K.Ya., Filatov N.N., Johannessen O.M., Melentyev V.V., Pozdnyakov D.V., Ryzhikh S.V., Shalina E.V., Tikhomirov A.I. Limnology and Remote Sensing: a contemporary approach (Eds. Kirill Ya. Kondratyev and Nikolay N. Filatov). Chichester: Springer-Praxis, 1999. 408 p.
- Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean colour // Limnol. Oceanogr., 1977. V. 22. P. 709-722.
- O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № C11. P. 24.93-24.953.
- Pozdnyakov D.V., Grassl H. Colour of inland and coastal waters: a methodology for its interpretation. Chichester, UK.: Springer-Praxis, 2003. 170 p.
- Pozdnyakov D.V., Korosov A.A., Shuchman R., and Edson R. Development of a tool for the assessment of water quality from visible satellite imagery taken over turbid inland waters (with Lake Michigan as an example) // In: Proc. of the 7th International Conference on Remote Sensing of Coastal and Marine Environments (Miami, May 20-22). CDROM, 2002.
- Pozdnyakov D.V., Lyaskovsky A.V. A comparison analysis of water quality retrieval algorithms for Case II waters // Earth Obs. Rem. Sens. 1999. № 1. P. 70-78. (in Russian).
- Pozdnyakov D.V., Pettersson L.H., Johannessen O.M., Lyaskovsky A.V., Filatov N.N., Bobylev L.P. SeaWiFS maps water quality parameters of the White Sea // Int. J. Rem. Sens., 2003. V. 24. № 21. P. 3-6. Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // Appl. Opt., 2000. V. 39. № 6. P. 897-912.
- SNNS, Stuttgart Neural Network Simulator / User Manual, Version 3.1. University of Stuttgart, Institute for parallel and distributed performance systems (anonymous ftp. informatik.uni-stuttgart.de (129.69.211.2). 1995.