

# Способ реконструкции палеоклимата по литолого-геохимическим свойствам донных отложений с использованием вейвлет-анализа и искусственных нейросетей на примере оз. Телецкое (Алтай)

Л.Г.Смолянинова<sup>1)</sup>, И.А.Калугин<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Институт геологии и минералогии имени В.С.Соболева СО РАН,  
[lsmol@yandex.ru](mailto:lsmol@yandex.ru)

<sup>2)</sup> Институт геологии и минералогии имени В.С.Соболева СО РАН,  
[ikalugin@igm.nsc.ru](mailto:ikalugin@igm.nsc.ru)

## Аннотация

Предложен метод реконструкции климатических параметров по литолого-геохимическим свойствам озерных отложений на основе комбинации вейвлет-анализа и искусственных нейронных сетей. Для этого используют временные ряды, построенные в виде хронологической последовательности вариаций этих свойств. Искусственные нейронные сети позволяют построить функции зависимости климатических параметров от свойств озерных отложений путем обучения на известных данных. Причем, ряды предварительно раскладывают с помощью вейвлет-разложения на частотные уровни, и для обучения используют только те уровни, которые захватывают периоды, присутствующие на известном участке реконструируемого параметра. Метод опробован на реконструкции среднегодовой температуры в районе горного Алтая по свойствам ядра из оз. Телецкое.

## Введение

Реконструкция палеоклимата является актуальной проблемой современной науки, так как позволяет находить закономерности изменения климата и зависимость этих изменений от различных факторов, начиная с астрономических и кончая техногенными. Длина рядов инструментальных измерений метеорологических параметров обычно не превышает 100-150 лет, редкие наблюдения охватывают 200-300 летний исторический период. Для того чтобы восстановить метеорологические параметры более отдаленного прошлого приходится использовать природные последовательности, образованные, например, в результате прироста древесины, роста кораллов и сталактитов, накопления ледниковых покровов, отложения донных осадков в водоемах. При этом ключевым вопросом является установление качественных и количественных зависимостей между климатическими параметрами и данными, полученными из этих последовательностей.

В данной работе предложена методика построения зависимостей климатических параметров, таких как температура ( $T$ ) и влажность ( $Pr$ ), от литолого-геохимических свойств озерных отложений на основе комбинации вейвлет-анализа и искусственных нейронных сетей.

Изменение любого климатического параметра представлено на временной шкале сложной совокупностью гармоник, за каждой из которых стоят реальные причины ее возникновения. Причинами могут быть

периодическое появление солнечных пятен и изменение их полярности, перемещения воздушных масс, колебания полюсов Земли и другие планетарные и космические факторы. Климатические циклы обычно делят по длительности на четыре группы: короткие (от года до десятков лет), межвековые (от сотен до нескольких тысяч лет), ледниковые (от десятков до сотен тысяч лет) и геологические (сотни тысяч и миллионы лет).

Поскольку инструментальные данные не превышают 300-летний исторический период, вряд ли следует ожидать от реконструкции по этим данным выделения ледниковых и геологических циклов. Эта задача выходит за рамки настоящей работы. Наша цель состояла в реконструкции высокочастотной части спектра, которая захватывает короткие и, по возможности, межвековые климатические циклы.

Сканирующий рентгеноспектральный микроанализ образцов донных осадков [1] позволяет проанализировать геохимический состав отложений с высокой частотой (через каждые 0,1-0,5мм), что, в свою очередь, дает возможность сопоставить их с годовыми значениями метеопараметров. А предлагаемая методика позволяет провести реконструкцию высокочастотной части спектра климатических параметров, используя временные ряды, построенные в виде хронологической последовательности вариаций литолого-геохимических свойств озерных отложений.

## Используемые методы

### Вейвлет-анализ

Временные ряды вариаций геохимических свойств донных отложений являются, как правило, сложной суперпозицией гармоник различной периодичности с возможными локальными особенностями, зависящими от различных климатических и геологических условий. В связи с этим представляется целесообразным разложить входные и выходные ряды данных на более простые уровни, для чего предлагается использовать вейвлет-анализ временных рядов, и в дальнейшем проводить реконструкцию, используя только те уровни, которые захватывают периоды, присутствующие на известном участке реконструируемого параметра (в дальнейшем – «исторический участок»).

Вейвлет-анализ [2,3,4] использует для разложения сигналов функции с графиком типа небольшой волны (вейвлеты) вместо традиционных длинных синусоидальных волн, используемых в анализе Фурье. Это дает более гибкую технику обработки сигналов, так как маленькие волны позволяют заметить хорошо локализованные изменения сигнала.

В общем случае непрерывное вейвлет-преобразование временного ряда  $s(t)$ , заданного на интервале  $-\infty \leq t \leq \infty$ , есть свертка

$$W(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \overline{G\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

этого ряда с семейством функций, получаемых из вейвлета  $G(t)$  всевозможными сдвигами ( $b$ ) и перемасштабированиями ( $a$ ), черта обозначает комплексное сопряжение.

## Способ реконструкции палеоклимата

Существует целый ряд вейвлетов  $G(t)$ . Для исследования гармонических и квазигармонических рядов желательно использовать вейвлеты обладающие симметрией. В этом смысле для непрерывного преобразования хорошо подходит вейвлет Морле вида  $G(t) = e^{-t^2/2} \cos(5t)$ .

С помощью непрерывного преобразования сигнал  $s(t)$  из двумерной плоскости переводится в трехмерное пространство с координатами: время ( $b$ ), масштаб ( $a$ ) и амплитуда ( $c$ ). При этом сигнал раскладывается на гармоники с частотами, соответствующими масштабам ( $a$ ).

Непрерывное вейвлет-разложение дает возможность рассмотреть частотные уровни в совокупности и выявить основные гармоники сигнала, которые в дальнейшем можно рассматривать независимо друг от друга.

Разделить непрерывный сигнал на уровни поможет дискретное преобразование с использованием быстрых алгоритмов. Использование вейвлета Морле в этом случае невозможно. Для дискретного преобразования лучше использовать ортогональные вейвлеты с компактным носителем. Из этого семейства мы выбрали симлет восьмого порядка как наиболее симметричный [4].

Для выбора нужных гармоник предлагается использовать пошаговую вейвлет-фильтрацию шумов. На первом шаге производим фильтрацию шума до верхнего уровня разложения, который соответствует самым низким частотам сигнала, с последующим вычитанием отфильтрованного сигнала из исходника. На следующем шаге зашумленный остаток сигнала рассматриваем как исходник, процедуру повторяем, используя следующий уровень разложения, и так далее до самого нижнего уровня. Описанная процедура, по сути, и есть дискретное вейвлет-разложение одномерного сигнала на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты. Количество уровней разложения зависит от гармонического состава исходного ряда.

Затем каждый уровень частот исследуем отдельно, используя визуальную информацию и метод Фурье. На периодограммах при этом хорошо видно насколько локализованы и зашумлены частотные спектры каждого уровня. Пользуясь этой информацией, легко определить уровень разложения, на котором шумовая компонента начинает преобладать. Для дальнейшей работы целесообразно провести фильтрацию шумов исходного сигнала до этого уровня, а также отсесть низкочастотные составляющие спектра, которые невозможно выявить на историческом участке. Для реконструкции метеопараметров будем использовать именно эти, очищенные от шума и низких частот, последовательности.

### Искусственные нейронные сети (ИНС)

Среди существующих методов реконструкции более близки к ИНС [5] методы, основанные на линейной математической регрессии. Однако, как правило, все природные явления имеют нелинейный характер. Поэтому предпочтительнее использование ИНС, являющихся суперпозицией нелинейных элементов (или функций) и способных строить многомерные нелинейные модели в процессе обучения на экспериментальных данных.

В данной работе использовался трехслойный нейроимитатор «Модели» [6], который имеет структуру, описываемую базисной функцией:

$$a_i = b_i + c_i \sum_j \sin\left(\phi_{ij} + \sum_k \omega_{jk} X_k\right),$$

где  $X$  – входы ИНС,  $b, c, \omega, \phi$  – подстраиваемые параметры,  $a_i$  –  $i$ -й выход ИНС,  $j$  меняется от единицы до числа нейронов.

«Модели» – это комплекс программ нейросетевой обработки данных, универсальный и высокоскоростной, с гибким интерфейсом. Этот программный комплекс выполнен в виде надстройки в вычислительную среду Microsoft Excel, что делает его весьма удобным в использовании. Он отлично зарекомендовал себя во время многолетней работы по обработке нечетко заданной информации. В качестве метода обучения здесь используется алгоритм двойственного функционирования (обратного распространения ошибки) [7].

Применение ИНС для реконструкции климатических параметров по литолого-геохимическим свойствам донных осадков имеет свою специфику. Поэтому для эффективного использования ИНС как инструмента необходимо выработать методы, эту специфику учитывающие.

Первые шаги по использованию ИНС были предприняты авторами ранее [8]. Однако, сочетание с вейвлет-разложением хронологических последовательностей дает новые расширенные возможности для реконструкции палеоклимата.

### **Описание методики на примере реконструкции среднегодовой температуры по литолого-геохимическим свойствам осадка озера Телецкое**

Для описания и опробования методики мы исследовали зависимость среднегодовой температуры от четырех параметров, характеризующих свойства донных осадков, взятых в озере Телецкое (Алтай). Выбор параметров сделан, исходя из конкретных климатических условий осадконакопления в озере за исторический период:

- рентгеновская плотность (Co/Inco) отражает колебания твердого стока в озеро и хорошо согласуется с ежегодным количеством атмосферных выпадений в течение наблюдений по метеостанции Барнаул с 1880 по 1996 гг.;
- содержание Vg зависит от количества органического вещества в осадке (определяемого растительной продуктивностью) и близко согласуется с профилем среднегодовой температуры на отрезке 1840-2002 гг.;
- отношение концентраций Rb/Sr и содержание Ti используется как индикатор бокового привноса обломочного материала и отражает режим кратковременных паводков, накладывающихся на общие изменения твердого стока.

Временные ряды измеренных параметров осадка построены на хронологической шкале с учетом средней скорости осадконакопления 0.49 мм в год. Возраст верхних слоев определен по  $^{137}\text{Cs}$  методу, а соответствующая ему скорость осадконакопления экстраполирована на полную глубину опробования – около 1500 мм.[9]

## Способ реконструкции палеоклимата

Данные по среднегодовой температуре метеостанции г. Барнаул за период 1838-2002 гг. взяты из [10].

### Исследование температурного ряда на историческом участке

Изменение среднегодовой температуры за период 1838-2002 гг. представлено на рис. 1а), а на рис. 2а) – непрерывное разложение этого ряда вейвлетом Морле. По картине разложения видно, что данный ряд можно разбить примерно на 5 уровней. Это и было сделано с использованием пошаговой вейвлет-фильтрации (рис. 1б-ф).

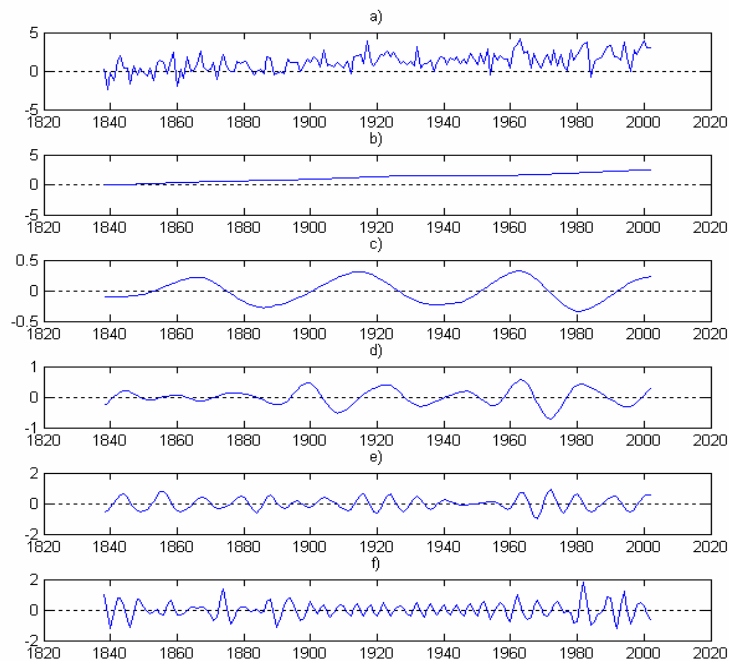


Рис. 1 Разложение температурного ряда на историческом участке с использованием пошаговой вейвлет-фильтрации на уровни: а) исходный ряд; б) пятый уровень разложения (тренд); с) четвертый уровень (периоды порядка 50 лет); d) третий уровень (15-20 лет); е) второй уровень (порядка 10 лет); f) первый уровень разложения (с периодами около 5 лет).

Самый низкочастотный уровень разложения (рис. 1б) представляет собой почти линейный тренд повышения температуры за рассматриваемый период. Поскольку этот тренд не несет в себе информацию о периодичностях изменения температуры, целесообразно убрать его из рассмотрения. После того, как тренд убрали, картина непрерывного разложения преобразуется и приобретает более удобный для анализа вид (рис. 2б). Для оставшихся четырех уровней с помощью фурье-анализа были построены периодограммы (рис. 3) и

выявлены основные периоды изменения среднегодовой температуры: 50, 21, 9, 6.5 и 5 лет. Оставшиеся за пределами фильтрации самого высокочастотного уровня данные относятся к области шумов и в дальнейшем участвовать не будут. Итак, для реконструкции мы можем взять только четыре уровня разложения данного температурного ряда, исключив при этом тренд и явные шумы.

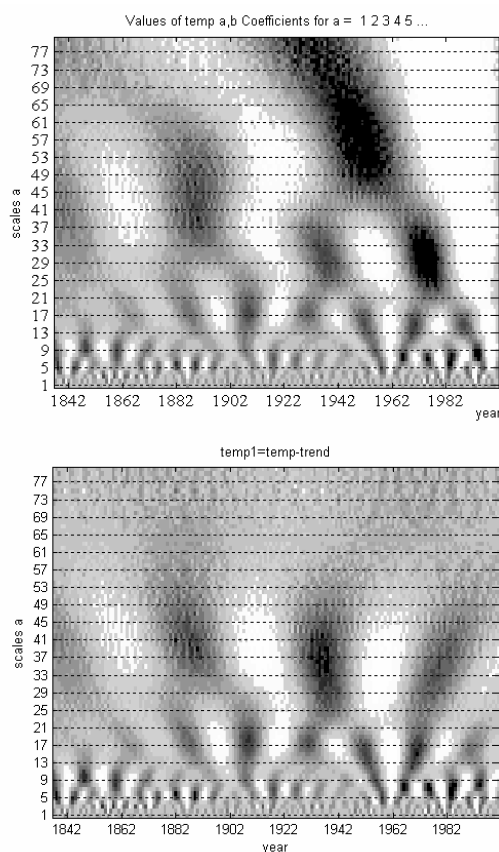


Рис. 2 Непрерывное разложение исходного температурного ряда вейвлетом Морле: а) – исходной кривой; б) – после удаления линейного тренда.

## Способ реконструкции палеоклимата

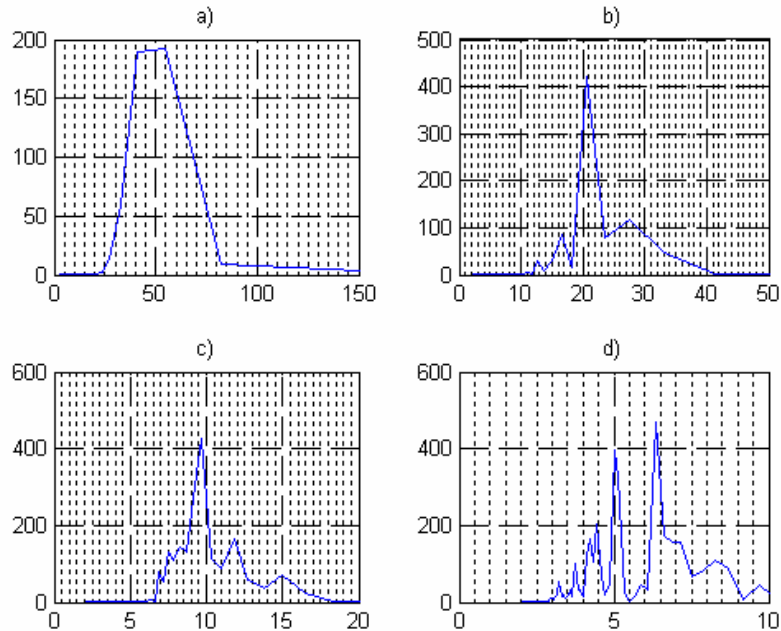


Рис. 3 Периодограммы для рядов разложения температуры: а) четвертый уровень (период порядка 50 лет); б) третий уровень (основной период = 21 год); в) второй уровень (основной период = 9 лет); д) первый уровень (периоды 6.5 и 5 лет).

### Исследование рядов литолого-геохимических показателей керна оз. Телецкое

Временные ряды выбранных для реконструкции параметров керна в 20 раз длиннее температурного метеоряда и захватывают 3000 лет. Соответственно, в их спектре присутствуют низкочастотные составляющие, полупериоды которых сравнимы с длиной исторического участка, а также намного превышающие его. Но мы, к сожалению, ограничены этим участком и можем пытаться реконструировать только те гармоники, которые в нем присутствуют.

Поэтому все выбранные ряды подверглись следующей обработке.

1. Было проведено вейвлет-разложение и убраны низкочастотные составляющие выше четвертого уровня.
2. Для каждого уровня, начиная с четвертого, проведен анализ Фурье, построены периодограммы и определены периоды изменения параметров.
3. Выделены области шумов для каждого из параметров, которые были также вычтены из спектров.

Таким образом, ряды литолого-геохимических параметров были подготовлены к процедуре реконструкции

### ИНС – реконструкция

Трехслойная ИНС в процессе обучения строит трансферную функцию выходных параметров от входных на примерах с известными ответами. В нашем случае обучающий паттерн – это исторический участок, где значения среднегодовой температуры известны. Параметрами, которые подаются на входы нейросети, являются концентрации  $Bg$ ,  $Ti$ , отношение концентраций  $Rb/Sr$  и рентгеновская плотность ( $Co/Inco$ ). С выхода снимается значение среднегодовой температуры. Цель работы ИНС – реконструировать значения среднегодовой температуры по четырем входным параметрам на глубину 3000 лет. Опять оговоримся, что реконструируются только высокочастотные части спектра с периодами менее длины исторического участка (<150 лет).

Для обучения была выбрана ИНС, содержащая пять формальных нейронов в промежуточном слое (структура сети: четыре входных нейрона, пять промежуточных и один выходной). Использование сети с меньшим количеством нейронов ведет к уменьшению коэффициента корреляции между известными температурными данными и полученными в результате работы трансферной функции. С другой стороны, увеличение числа нейронов приводит к так называемой «переобученности» сети, когда невязка на обучающих примерах становится много меньше, чем на тестовых.

Реконструкция как результат обучения ИНС представлена на рис. 4. При этом коэффициент корреляции на историческом участке равен 0,706.

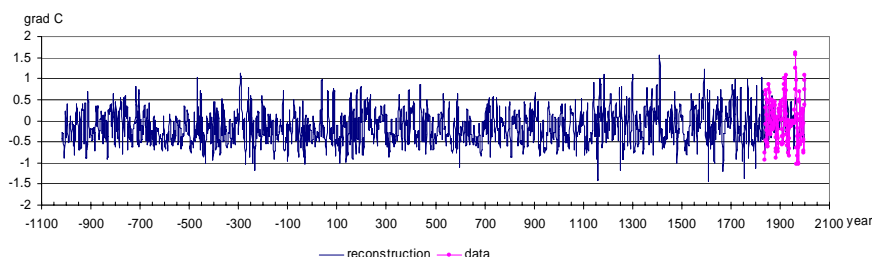


Рис. 4 ИНС-реконструкция среднегодовой температуры на глубину 3000 лет по четырем уровням вейвлет-разложения входных параметров: концентраций  $Bg$  и  $Ti$ , отношения концентраций  $Rb/Sr$  и рентгеновской плотности ( $Co/Inco$ ).

Непрерывное разложение полученной температурной кривой показано на рис. 5. Как видно из рисунка, кроме реконструируемых гармоник с периодами 50 лет и меньше, появляются низкочастотные (с периодами до 1000 лет). Поскольку таких гармоник нет ни во входных параметрах, ни в исходной температуре, будем рассматривать их как паразитные (низкочастотный шум). Прделав процедуру фильтрации такую же, как для литолого-геохимических показателей керна, очистив кривую реконструкции от низкочастотных и высокочастотных шумов, получим окончательный вариант (рис. 6). При этом коэффициент корреляции на историческом участке несколько увеличивается и равен 0,724.



## Способ реконструкции палеоклимата

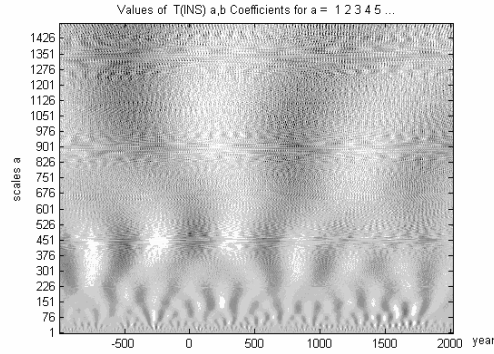


Рис. 5 Непрерывное разложение вейвлетом Морле реконструированного температурного ряда.

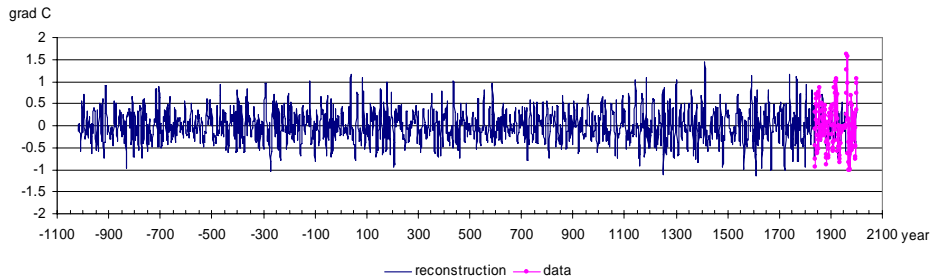


Рис. 6 Реконструированный температурный ряд после фильтрации низкочастотных и высокочастотных шумов.

Итак, реконструкция гармоник среднегодовой температуры, присутствующих на историческом участке получена. Но у нас остается еще тренд. Из рассмотрения геохимических показателей на историческом участке (рис. 7) ясно, что за температурный тренд ответственно в преобладающей степени изменение концентрации Вг.

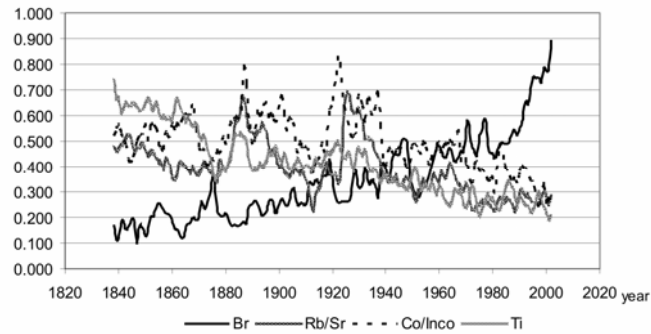


Рис. 7 Временные ряды геохимических показателей на историческом участке.

Воспользуемся этим обстоятельством и добавим к полученной реконструкции гармоники, отвечающие за тренд температуры. Для этого обучим ИНС получать значения пятого уровня вейвлет-разложения температуры по данным пятого уровня разложения Вг. В данном случае достаточно было сети с тремя формальными нейронами в промежуточном слое (структура сети: один входной нейрон, три промежуточных, один выходной). Результат обучения – на рис. 8.

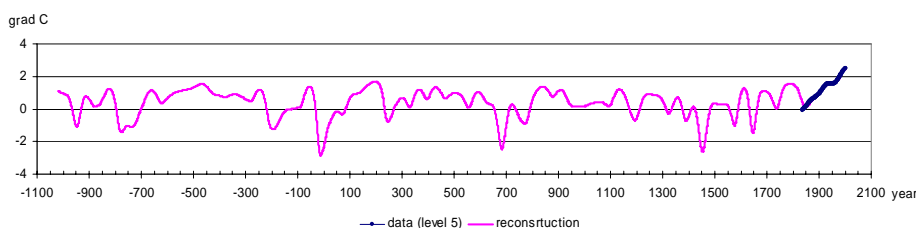


Рис. 8 Результат реконструкции пятого уровня разложения по концентрации Вг.

Теперь сложим полученную высокочастотную реконструкцию с реконструкцией тренда и получим результирующую кривую (рис. 9). На историческом участке коэффициент корреляции между результирующей реконструкцией и температурными данными, в которых отфильтрованы высокочастотные шумы, но сохранен тренд, равен 0,91, т.е. коэффициент корреляции возрос на 19%.

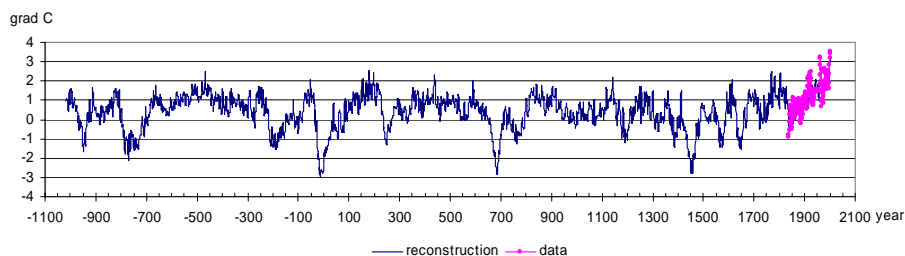


Рис. 9 Результирующая кривая реконструкции среднегодовой температуры по геохимическим показателям донных осадков оз. Телецкое.

### Заключение

Предложенная методика построения зависимостей климатических параметров от литолого-геохимических свойств озерных отложений на основе комбинации вейвлет-анализа и искусственных нейронных сетей позволяет реконструировать изменения климата в тех пределах, в которых эти изменения проявлены на историческом участке. Для этого используются временные ряды, построенные в виде хронологической последовательности вариаций свойств осадков, полученных из кернов озерных отложений. Высокие значения коэффициента корреляции между историческими значениями среднегодовой

## Способ реконструкции палеоклимата

температуры и полученными в результате реконструкции (0,7-0,9), а также устойчивость результатов обучения ИНС (с разных начальных значений подстраиваемых параметров сеть приходит к одному результату) позволяют говорить о корректности данного способа реконструкции.

Обычно реконструкция палеоклимата затрагивает только низкочастотные составляющие климатических параметров, с периодами более 100 лет. Предложенная методика позволит дополнить эти разработки спектрами высоких частот и отслеживать изменения метеопараметров прошлого с точностью до десятков лет и менее. Это, в свою очередь, дает больше возможностей для прогноза на будущее.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президиума СО РАН (ИП-34, ПП-34).

### Литература:

1. Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракшун Я.В. Сканирующий рентгеноспектральный микроанализ образцов донных осадков с использованием синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 2. С. 204-206.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996. Т. 166. № 11. С. 1145-1170.
3. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005. – 191 с.
4. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
5. Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л. и др., Нейроинформатика. Новосибирск: Наука, 1998. – 320 с.
6. Щемель А.Л. Обработка неточно заданной информации с помощью нейросетей // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н. Красноярск, 2002. – 18 с.
7. Bartsev S.I., Okhonin V.A. The algorithm of dual functioning (back-propagation): general approach, versions and applications. Krasnoyarsk, 1989. – 16 p. (Preprint of Biophysics Institute SB AS USSR; № 107B).
8. Kalugin I. Daryin A. Smolyaninova L. Andreev A. Diekmann B. Khlystov O. 800-yr-long records of annual air temperature and precipitation over southern Siberia inferred from Teletskoye Lake sediments // Quaternary Research 2007. Vol. 67. № 3. P. 400-410.
9. Калугин И.А., Дарьин А.В., Бабич В.В. 3000-летняя реконструкция среднегодовых температур Алтайского региона по литолого-геохимическим индикаторам донных осадков оз. Телецкое. ДАН. 2009. Т. 426. № 4. С. 520-522.
10. <http://www.meteo.ru/climate/temp.php>

Статья поступила 26 апреля 2013 г.  
После доработки 21 мая 2013 г.