

## Нейронечеткое прогнозирование уровня глюкозы в крови для больных инсулинозависимым диабетом

# 11, ноябрь 2010

авторы: Чернецов С. А., Моор Д. А.

УДК.519.6

МГТУ им. Н.Э.Баумана

serge.a.ch@gmail.com, dmitry\_moor@mail.ru

### Введение

Сахарный диабет 1 типа - это метаболическое заболевание, вызванное абсолютным дефицитом секреции инсулина и характеризующееся неспособностью организма поддерживать уровень глюкозы в крови (BG - Blood Glucose) в целевом интервале 4-6 ммоль/л – в обычном состоянии и до 9 ммоль/л - после еды. Диабет вызывает множество опасных осложнений, избежать которые можно только путем контроля уровня BG и его удержания в физиологичном интервале. Основным путем решения этой задачи в настоящее время является введение в кровь пациента искусственных препаратов (генноинженерных человеческих инсулинов), которые могут имитировать действие эндогенного инсулина, вырабатываемого  $\beta$ -клетками здоровой поджелудочной железы.

Оптимальные типы и дозы искусственного инсулина (далее - инсулина) зависят от многих факторов. Подбор этих типов и доз является сложной задачей, с которой могут справиться далеко не все пациенты. Для решения указанной задачи созданы системы непрерывного измерения уровня BG – Continuous Glucose Monitoring Systems (CGM-системы), а также системы непрерывного подкожного введения инсулина (инсулиновые помпы – insulin pumps).

На основе CGM-систем и инсулиновых помп разработаны и интенсивно разрабатываются системы автоматического управления уровнем глюкозы в крови

пациента. С алгоритмической точки зрения эти системы включают в себя две следующие основные подсистемы: подсистема прогнозирования уровня BG; подсистема определения оптимального времени и требуемой дозы инсулина.

Известно значительное число публикаций, посвященных задаче прогнозирования уровня BG, среди которых можно выделить следующие три направления [1 - 3].

1) Использование математических моделей динамики глюкозы в теле пациента. При этом используются модели в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных, а также интегро-дифференциальных уравнений.

2) Использование нейросетевых и, в частности, нейронечетких алгоритмов прогнозирования значений уровня BG.

3) Использование комбинированных решений.

Данная работа посвящена исследованию точности нейронечетких алгоритмов прогнозирования значений уровня BG.

В качестве инструмента исследования используется среда MatLab R2009.

### Постановка задачи

Пусть

$$\Delta = (\Delta_1, \Delta_2) = (\dots, t_{-(n-1)}, t_{-(n-2)}, \dots, t_{-1}, t_0, t_1, t_2, \dots, t_m) -$$

дискретная временная сетка с постоянным шагом  $\delta t = 20$  мин. Здесь  $t_0$  - текущий момент времени;  $\Delta_1 = (\dots, t_{-(n-1)}, t_{-(n-2)}, \dots, t_{-1}, t_0)$  - сетка «предыстории»;  $\Delta_2 = (t_1, t_2, \dots, t_m)$  - сетка, на которой выполняется прогноз.

Известны значения уровней BG и введенных пациенту доз инсулина в узлах сетки  $\Delta_1$  - векторы

$$b(\Delta_1) = (\dots, b_{-(n-1)}, b_{-(n-2)}, \dots, b_{-1}, b_0)^T, i(\Delta_1) = (\dots, i_{-(n-1)}, i_{-(n-2)}, \dots, i_{-1}, i_0)^T.$$

Кроме того, известны значения компонентов вектора

$$c(\Delta_1) = (\dots, c_{-(n-1)}, c_{-(n-2)}, \dots, c_{-1}, c_0)^T,$$

где  $c_{-j}$  - количество углеводов принятых с пищей в момент времени  $t_{-j}$  (оценивается и задается пациентом).

Совокупность векторов  $b(\Delta_1), i(\Delta_1), c(\Delta_1)$  обозначим  $u(\Delta_1)$ :

$$u = u(\Delta_1) = (b(\Delta_1), i(\Delta_1), c(\Delta_1)) = (\dots, b_{-(n-1)}, \dots, b_0, \dots, i_{-(n-1)}, \dots, i_0, \dots, c_{-(n-1)}, \dots, c_0)^T.$$

Ставится задача прогноза уровня BG на период прогноза  $T = [t_m - t_0]$ , т.е.

задача поиска вектора  $\tilde{y} = \tilde{b}(\Delta_2) = (\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_m)^T$ .

Критерии точности прогноза строятся на основе ошибок прогноза

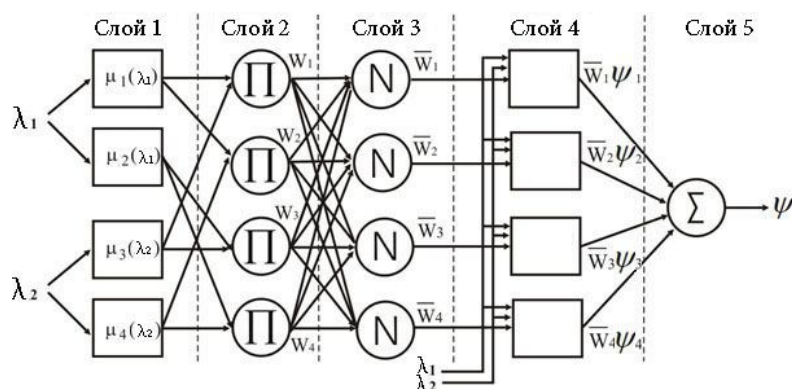
$$\varepsilon_j = \left| b_j - \tilde{b}_j \right|, \quad j = 1, 2, \dots,$$

где  $b_j$  - фактическое значение уровня BG в момент времени  $t_j$ . Точнее говоря, в качестве указанных критериев используются математическое ожидание  $m_j$  ошибки прогноза  $\varepsilon_j$  и ее среднеквадратичное отклонение  $\sigma_j$ .

Вектор фактических значений уровня BG в узлах сетки  $\Delta_2$  обозначим  $y = b(\Delta_2) = (b_1, b_2, \dots)^T$ .

### Используемая нейронная сеть

Система вывода ANFIS реализуется в виде нейроподобной структуры, состоящей из пяти слоев (рис. 1).



**Рис. 1.** Структура нейро-нечеткой сети ANFIS

Для обучения сети ANFIS в работе используется гибридный градиентный метод [4]. Для оценки погрешности нечеткой нейронной сети строится функция ошибки

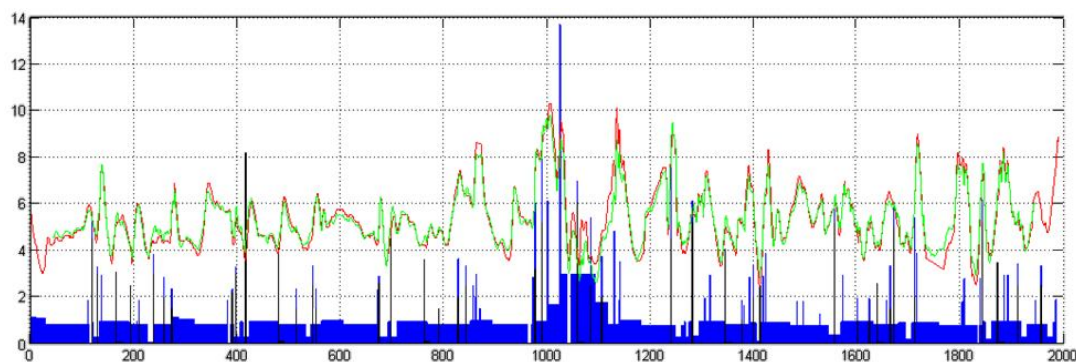
$$E(a, b, p, q, r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\psi(\Lambda_i) - \bar{\psi}(\Lambda_i))^2 \rightarrow \min_{a, b, z} \quad (6)$$

представляющая собой среднеквадратическое отклонение между фактическими значениями выходной переменной  $\psi(\Lambda_i)$  и точечной оценкой  $\bar{\psi}(\Lambda_i)$ , полученной на основе нечеткого вывода. Здесь  $a, b$  – параметры функций принадлежности первого слоя нечеткой нейронной сети;  $p, q, r$  – параметры четвертого слоя нечеткой нейронной сети;  $z$  – один из этих параметров.

### Исследование эффективности

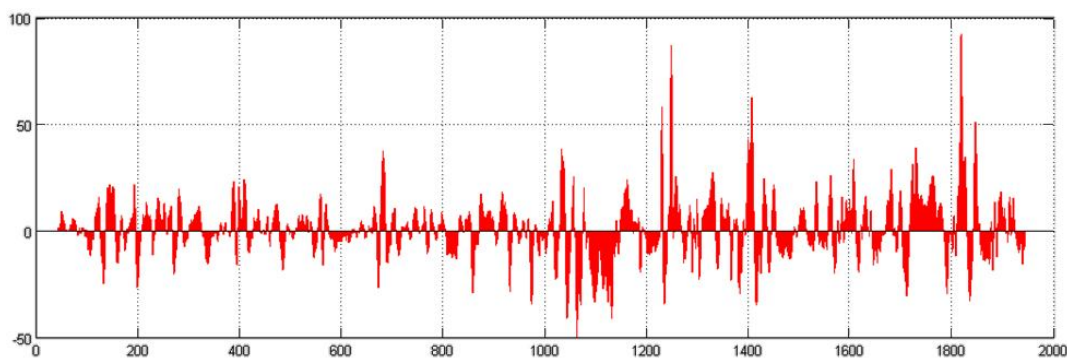
Исследовалась точность прогнозирования на 20 минут, 90 минут и 180 минут. Для двадцатиминутного прогноза на следующем рисунке (рисунок 2) синим цветом показаны значения инсулина, вводимые пациенту, черный цвет соответствует приемам пищи, красный – истинному значению глюкозы, а зеленым цветом изображены прогнозируемые значения уровня глюкозы.

На рисунке ниже (рисунок 3) изображена соответствующая функция ошибки прогноза (в процентах от истинного значения).

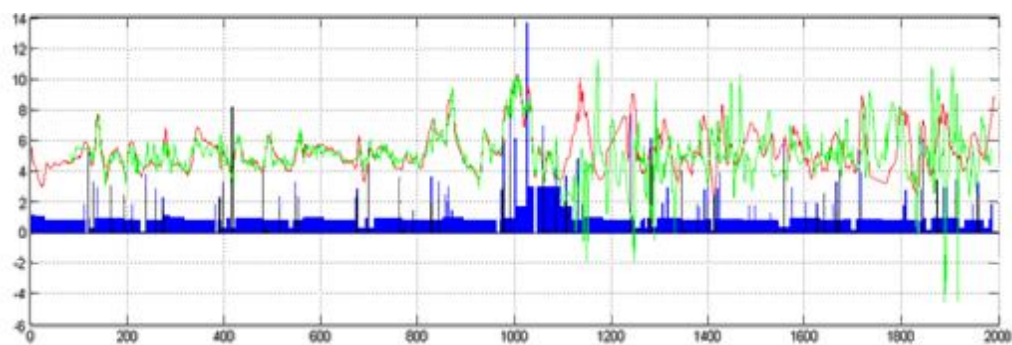


**Рис. 2.** Прогноз на 20 мин

Рисунок 4 соответствует полуторачасовому прогнозу. Здесь также синим цветом показаны значения инсулина, вводимые пациенту, черный цвет соответствует приемам пищи, красный – истинному значению глюкозы, а зеленым цветом изображены прогнозируемые значения уровня глюкозы.

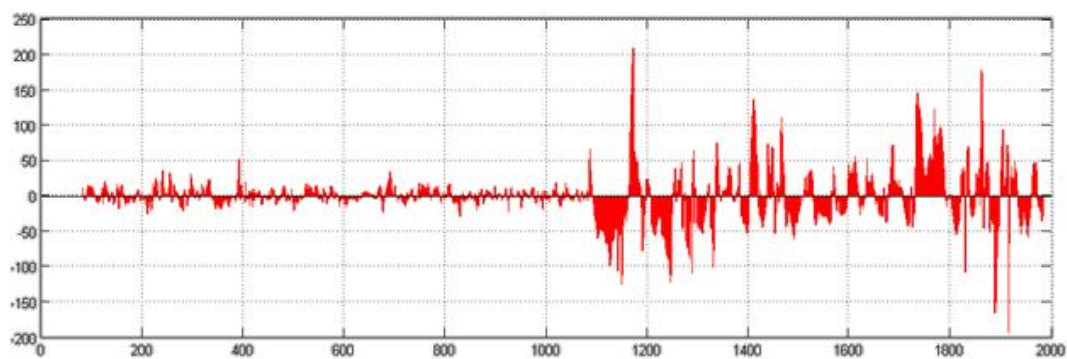


**Рис. 3.** Ошибка прогноза на 20 мин



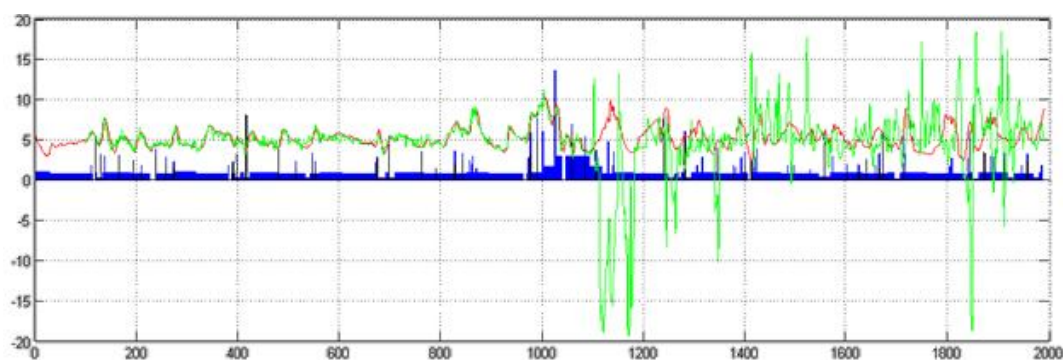
**Рис. 4.** Прогноз на 1.5 часа

На рисунке 5 изображена функция ошибки прогноза (в процентах от истинного значения).



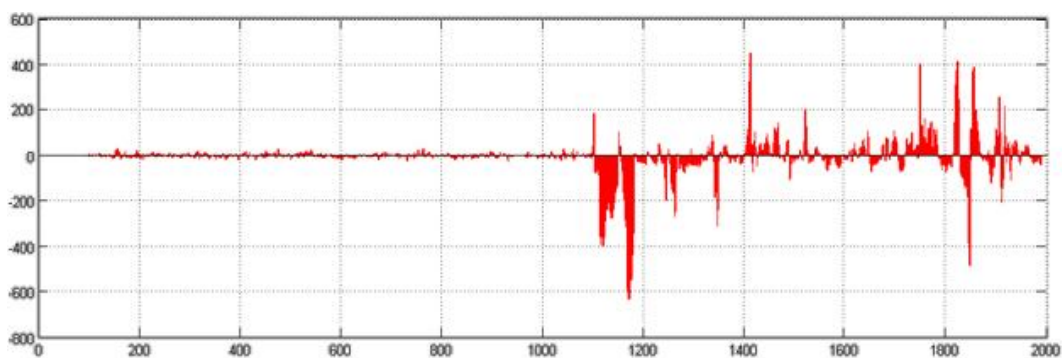
**Рис. 5.** Ошибка прогноза на 1.5 часа

Результаты исследования трехчасового прогноза представлены на рисунке 6, где синим цветом показаны значения инсулина, вводимые пациенту, черный цвет соответствует приемам пищи, красный – истинному значению глюкозы, а зеленым цветом изображены прогнозируемые значения уровня глюкозы.



**Рис. 6.** Прогноз на 3 часа.

Рисунок 7 иллюстрирует функцию ошибки прогноза (в процентах от истинного значения) для данного прогноза.



**Рис. 7.** Ошибка прогноза на 3 часа.

### Заключение

Результаты исследования показывают, что адаптивная система нейронечеткого вывода ANFIS показывает удовлетворительные результаты на сравнительно коротких прогнозах, в то время как для более длительных прогнозов ошибка

прогнозирования резко возрастает. Необходимы дополнительные исследования для оценки влияния на точность прогноза числа входных данных и их состава.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-00816-а.

### **Литература**

1. Гоменюк С.М., Емельянов А.О., Карпенко А.П., Чернецов С.А. Методы прогнозирования оптимальных доз инсулина для больных сахарным диабетом I типа. Обзор // Наука и образование: электронное научно-техническое издание, [www.technomag.edu.ru](http://www.technomag.edu.ru), апрель, 2009.

2. Гоменюк С.М., Емельянов А.О., Карпенко А.П., Чернецов С.А. Обзор методов и систем прогнозирования оптимальных доз инсулина для больных сахарным диабетом I типа // Информационные технологии. 2010, №3, с.46-57.

3. Chernetsov S.A., Emelyanov A.O., Karpenko A.P. Research of Neural Network-Based Blood Glucose Level Forecasting Systems for Insulin-Dependant Diabetes Patients // The 6th international workshop on Wearable Micro and Nanosystems for Personalised Health (in print).

4. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов.- М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.