

УДК 615.099+546.62

НЕЙРОТОКСИКОКИНЕТИКА АЛЮМИНИЯ

Усманова Э. Н.

младший научный сотрудник

Федеральное бюджетное учреждение науки «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека»

Уфа, Россия

Мусабилов Д. Э.

младший научный сотрудник

Федеральное бюджетное учреждение науки «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека»

Уфа, Россия

Адиева Г. Ф.

к.б.н., старший научный сотрудник

Федеральное бюджетное учреждение науки «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека»

Уфа, Россия

Аллаярова Г. Р.

к.б.н., старший научный сотрудник

Федеральное бюджетное учреждение науки «Уфимский научно-исследовательский институт медицины труда и экологии человека»

Уфа, Россия

Аннотация:

В работе изучено влияние однократного введения гидроксида алюминия (100 мг/кг) на содержание алюминия и эссенциальных элементов (Ca, Mg, Fe) в

головном мозге крыс. Эксперимент проведён на 59 животных с забором ткани через 1, 2, 4, 6, 24, 48 и 96 часов после введения. Концентрации элементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии, статистический анализ выполняли с использованием ANOVA.

Показано, что гидроксид алюминия вызывает накопление алюминия в мозге с выраженными пиками на 6 и 96 часах. Выявлены изменения обмена эссенциальных элементов: нарушение кальциевого гомеостаза, транзитное снижение магния и волнообразные изменения железа. Полученные данные подтверждают влияние алюминия на ионный баланс мозга и его потенциальную нейротоксичность.

Ключевые слова: гидроксид алюминия, микроэлементы, головной мозг, нейротоксическое действие, крысы, интоксикация.

NEUROTOXICOKINETICS OF ALUMINUM

Usmanova E. N.

junior researcher

Federal Budgetary Institution "Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology",

Ufa, Russia

Musabirov D. E.

junior researcher

Federal Budgetary Institution "Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology",

Ufa, Russia

Adieva G. F.

Ph.D., senior researcher

Federal Budgetary Institution "Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology",

Ufa, Russia

Allayarova G. R.

Ph.D., senior researcher

Federal Budgetary Institution "Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology",

Ufa, Russia

Abstract: This study examined the effects of a single administration of aluminum hydroxide (100 mg/kg) on the levels of aluminum and essential elements (Ca, Mg, Fe) in the rat brain. The experiment was conducted on 59 animals, with tissue samples collected at 1, 2, 4, 6, 24, 48, and 96 hours after administration. Element concentrations were determined by atomic absorption spectroscopy, and statistical analysis was performed using ANOVA.

It was shown that aluminum hydroxide causes aluminum accumulation in the brain, with pronounced peaks at 6 and 96 hours. Changes in essential element metabolism were identified, including disruption of calcium homeostasis, a transient decrease in magnesium, and fluctuating iron levels. These data confirm the effects of aluminum on the ion balance of the brain and its potential neurotoxicity.

Keywords: aluminum hydroxide, trace elements, brain, neurotoxicity, rats, intoxication.

Актуальность. Вопросы токсического воздействия алюминия продолжают привлекать внимание исследователей в связи с его повсеместным присутствием в окружающей среде и способностью накапливаться в организме. Особый интерес

представляет влияние соединений алюминия на структуры центральной нервной системы, в том числе на головной мозг [1–2].

Гидроксид алюминия ($\text{Al}(\text{OH})_3$) относится к устойчивым формам данного элемента и способен депонироваться в тканях, оказывая потенциально неблагоприятное воздействие. Важным аспектом его токсичности является влияние на баланс эссенциальных элементов, таких как кальций, магний и железо, играющих ключевую роль в обеспечении нормального функционирования нейронов [3].

Нарушение кальциевого гомеостаза рассматривается как один из ведущих механизмов нейротоксического действия алюминия, так как кальций участвует в передаче нервных импульсов и регуляции внутриклеточных процессов [4]. Взаимодействие алюминия с магнием может приводить к изменению активности ферментных систем и нарушению нейрональной пластичности [5]. Кроме того, дисбаланс железа в тканях мозга ассоциируется с развитием нейродегенеративных процессов [6].

Цель исследования: провести оценку изменений содержания кальция, магния и железа в головном мозге крыс при воздействии гидроксида алюминия в условиях острой интоксикации.

Материалы и методы. Эксперимент выполнен на 59 лабораторных крысах массой 200–250 г. Животные были разделены на контрольную группу ($n=10$) и опытные группы ($n=49$), включающие 7 подгрупп по 7 животных в каждой. В опытных группах однократно вводили гидроксид алюминия в дозе 100 мг/кг массы тела. Отбор биологического материала осуществляли через 1, 2, 4, 6, 24, 48 и 96 часов после введения вещества. Выведение животных из эксперимента проводили методом декапитации. Определение содержания алюминия, кальция, магния и железа в тканях головного мозга проводили методом атомно-

абсорбционной спектроскопии. Для статистической обработки использовали дисперсионный анализ (ANOVA), при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение.

Содержание алюминия в головном мозге изменялось неравномерно и зависело от времени после введения гидроксида алюминия (табл. 1). Уже через 2 часа наблюдалось увеличение концентрации на 5,4 % по сравнению с контролем, но эти изменения не достигали статистической значимости. Более выраженный рост отмечался через 4 часа (+17,9 %). Максимальное повышение зарегистрировано через 6 часов, где уровень алюминия превышал контрольные значения более чем в 3,2 раза. После 24 часов наблюдалось снижение концентрации алюминия до уровней, близких к контрольным, однако к 96 часу вновь фиксировалось значительное увеличение (+191,7 %), что свидетельствует о его накоплении в тканях мозга и возможном перераспределении в организме.

Таблица 1. Динамика содержания алюминия и эссенциальных элементов в головном мозге крыс при острой интоксикации гидроксидом алюминия ($M \pm \sigma$, мг/кг)

Группа	Al	Ca	Mg	Fe
Контроль	2,97±0,97	44,09±10,39	36,63±1,54	419,82±64,19
1 час	2,09±0,51 ($p > 0,05$)	63,33±7,86 ($p = 0,002$)	34,79±2,13 ($p > 0,05$)	463,71±56,72 ($p > 0,05$)
2 часа	3,13±1,46 ($p > 0,05$)	60,41±4,87 ($p = 0,006$)	37,36±3,24 ($p > 0,05$)	517,59±26,69 ($p = 0,002$)
4 часа	3,50±0,96 ($p > 0,05$)	55,44±2,01 ($p = 0,018$)	34,46±0,86 ($p = 0,041$)	494,06±15,66 ($p = 0,010$)
6 часов	9,66±4,57 ($p = 0,001$)	69,03±8,69 ($p = 0,001$)	26,74±2,60 ($p = 0,001$)	440,06±46,67 ($p > 0,05$)
24 часа	2,02±0,94 ($p = 0,028$)	71,16±7,20 ($p = 0,001$)	22,79±0,62 ($p = 0,001$)	445,10±21,29 ($p > 0,05$)
48 часов	2,40±0,66 ($p > 0,05$)	69,00±5,31 ($p = 0,001$)	26,39±2,63 ($p = 0,001$)	453,57±21,87 ($p > 0,05$)
96 часов	8,66±3,85 ($p = 0,001$)	30,66±5,62 ($p = 0,001$)	36,83±1,19 ($p > 0,05$)	494,84±61,85 ($p = 0,029$)

Анализ концентрации кальция показал выраженную реакцию на воздействие токсиканта. Уже через 1 час уровень кальция увеличивался на 43,6 % относительно контроля. На протяжении 2–48 часов сохранялись повышенные значения (на 25–61 % выше контрольных). Максимальные показатели отмечались через 24 часа (+61,4 %). Однако к 96 часу происходило резкое снижение содержания кальция (на 30,5 % ниже контроля), что может свидетельствовать о срыве компенсаторных механизмов и выраженном нарушении кальциевого гомеостаза.

Результаты исследования показали выраженные изменения динамики магния в контрольной группе в зависимости от времени наблюдения. На ранних сроках (1–2 часа) статистически значимых отличий от исходного уровня не выявлено. Начиная с 4-го часа отмечено достоверное снижение концентрации магния на 5,9, которое усиливалось к 24-му часу, достигая снижения на 26,8 %, и сохранялось на 48-м часу на уровне 37,8 % ниже контроля. К 96-му часу наблюдалась нормализация концентрации магния до $36,83 \pm 1,19$, при этом статистически значимых отличий от исходного уровня выявлено не было. Полученные данные указывают на наличие фазных изменений содержания магния с выраженным снижением на промежуточных этапах наблюдения и неполной компенсацией к позднему периоду.

Результаты исследования показали, что содержание железа в динамике претерпевало выраженные колебания относительно контрольного уровня. Статистически значимое повышение концентрации железа отмечалось на 2-м часу наблюдения на 23,3 %, а также на 4-м часу на 17,7 %. В остальные временные точки (1, 6, 24 и 48 часы) достоверных отличий от контрольных значений не выявлено, при этом уровень железа варьировал в пределах близких к исходным значениям. К 96-му часу наблюдалось повторное повышение концентрации железа на 17,9 % относительно контроля. Полученные данные свидетельствуют о

Дневник науки | www.dnevnika.ru | СМН ЭЛ № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

волнообразном характере изменений содержания железа с двумя пиками повышения на раннем и позднем этапах наблюдения.

Заключение. Проведенное исследование показало, что однократное введение гидроксида алюминия приводит к накоплению алюминия в тканях головного мозга с максимальными значениями через 96 часов. Выявленные изменения уровня кальция свидетельствуют о нарушении его гомеостаза. Магний демонстрирует кратковременное повышение с последующей нормализацией, тогда как концентрация железа остается без существенных изменений.

Полученные результаты подтверждают влияние алюминия на обмен эссенциальных элементов и подчеркивают необходимость дальнейшего изучения механизмов его нейротоксического действия.

Библиографический список

1. Hu W, Wang Z, Wang R, et al. Advances in neural mechanisms and magnetic resonance imaging biomarkers of aluminum exposure causing cognitive impairment. *J Trace Elem Med Biol.* 2026;94:127834. doi:10.1016/j.jtemb.2026.127834
2. Zhang X, Chen D, Li W, et al. Aluminum-induced neurotoxicity via epigenetic crosstalk: research progress. *J Appl Toxicol.* 2026;46(5):1433-1446. doi:10.1002/jat.70087
3. Wang L, Mei L, Zang Z, et al. Aluminum hydroxide exposure induces neurodevelopmental impairment in hESC-derived cerebral organoids. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2023;256:114863. doi:10.1016/j.ecoenv.2023.114863
4. Baraibar AM, de Pascual R, Carretero VJ, Liccardi N, Juárez NH, Hernández-Guijo JM. Aluminum alters excitability by inhibiting calcium, sodium, and potassium currents in bovine chromaffin cells. *J Neurochem.* 2023;165(2):162-176. doi:10.1111/jnc.15784

5. Burgos Castillo MJ, Cruz Palacios MJ, Iorgatchof Xavier K, Calafati Carandina SA, Arbeláez Quintero I, do Prado Assunção L. Evaluation of aluminum and magnesium absorption following the oral administration of an antacid suspension containing magaldrate in healthy women under fed conditions. *Adv Ther.* 2024;41(11):4089-4097. doi:10.1007/s12325-024-02969-9

6. Peng Y, Chang X, Lang M. Iron homeostasis disorder and Alzheimer's disease. *Int J Mol Sci.* 2021;22(22):12442. doi:10.3390/ijms222212442