

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТОКСИЧНОСТИ ОБРАБОТАННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ АКВАКУЛЬТУРЫ (НА ПРИМЕРЕ *Danio rerio*)

А.Б. Шикунец¹, В.Н. Штепа², В.Г. Родченко³

¹Полесский государственный университет, lesha.shikunets@gmail.com

²Белорусский государственный технологический университет, tppoless@gmail.com

³Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, rovar@mail.ru

Аннотация. Приведен пример использования автоматического обнаружения скрытых закономерностей на основе свойств классов в эмбриотоксических исследованиях. Сделаны выводы о применимости данного метода при определении токсичности водных растворов, а также о перспективе дальнейших работ в данной области.

Ключевые слова: анолит, католит, *Danio rerio*, машинное обучение

Введение. В последние годы в Беларуси наблюдается активное развитие аквакультуры, в том числе, выращивания рыбы в условиях систем замкнутого водоснабжения. Это позволяет получать рыбную продукцию круглый год, независимо от сезона. Данный факт говорит о необходимости внедрения новых технологий, позволяющих снизить нагрузку на окружающую среду, а также повысить эффективность такого производства. Примером может служить применение безреагентной обработки водных растворов, в которых содержатся объекты аквакультуры. В частности, речь может идти об использовании электролизных технологий с целью осуществления pH-коррекции, а также удаления ряда загрязнителей из оборотных вод рыбоводных установок [1, с. 305].

Основная часть. По разнообразным литературным данным, при различных режимах обработки воды таким способом, на живые организмы, потребляющие ее, может оказываться как негативное, так и положительное воздействие [2, с. 81]. Соответственно, актуальным является поиск новых методов точной оценки влияния продуктов электролитической обработки, а также иных гидрхимических показателей водных растворов на обитателей установок замкнутого водоснабжения (УЗВ).

На данный момент в аквакультуре существует способ определения токсичности растворов, основанный на изучении моторных функций эмбрионов и личинок рыбок *Danio rerio* находящихся в таких растворах под воздействием яркого верхнего света. Исследования проводятся на разных этапах эмбрионального развития и носят следующие названия: PMR (Photomotor response), LMR (Locomotor response), STC (Spontaneous tail coiling) [3, с. 13].

По результатам данного теста исследователь получает числовой массив данных, описывающий различные показатели двигательной активности *Danio rerio*, что позволяет по итогам статистического анализа судить о наличии, либо отсутствии токсического эффекта опытного раствора по сравнению с контрольным.

Однако, классическая статистическая обработка такого массива данных при помощи стандартных инструментов, таких как Microsoft Excel и Statistica может показать только прямую зависимость изменения подвижности эмбрионов и личинок в различных растворах. Важным аспектом является изучение скрытых закономерностей совместного влияния определенных показателей исследуемого раствора на живые организмы. Кроме того, значительным преимуществом может быть прогнозирование токсичности раствора исходя из уже известных физико-химических, и иных его показателей.

В таком случае обосновано применение технологий машинного обучения, направленных как на определение неочевидных взаимосвязей между признаками раствора и состоянием гидробионтов, так и на дальнейшие изменения их свойств.

Суть такого способа заключается в формировании так называемых классов. Сначала предлагается в признаковых пространствах наблюдаемых объектов формировать области определения классов (паттерны). Затем на основе оценок взаимного размещения паттернов выявлять признаковые подпространства, в которых классы не пересекаются [4, с. 144].

На основании уже имеющегося массива данных о влиянии электролитически-обработанных водных растворов на подвижность эмбрионов и личинок *Danio rerio* были сформированы 3 класса,

а именно: контроль, католит и анолит, соответственно названиям растворов, в которых содержались исследуемые экземпляры. После формирования классов был отобран ряд признаков, по которым производилось сравнение. Такими признаками являлись: pH, ОВП (окислительно-восстановительный потенциал), свет, воздействующий на эмбрионы, и средняя скорость их движения во время эксперимента. Совокупность таких данных в дальнейшем будет именоваться обучающей выборкой.

В усредненном виде исходная информация по гидрохимическим показателям, а также по количеству исследуемых экземпляров, представлены в таблице 1:

Таблица 1. – Средние значения измеряемых в ходе эксперимента физико-химических показателей электролитически обработанных водных растворов

Раствор/Показатель	ОВП \pm SE, мВ	TDS \pm SE, ppm	pH \pm SE, ед.	n
Контроль (скважинная вода)	65,32 \pm 10,20	232,00 \pm 8,75	7,57 \pm 0,09	16
Католит	-47,03 \pm 6,54	247,00 \pm 13,56	8,60 \pm 0,10	16
Анолит	60,84 \pm 9,07	241,00 \pm 9,18	7,15 \pm 0,02	16

Примечание – SE – стандартная ошибка среднего, n – объем выборки значений (количество эмбрионов в группе)

Необходимо отметить, что при анализе показатель TDS (Total Dissolved Solids), либо же общая минерализация раствора, не учитывался, так как имел схожие значения во всех исследуемых группах, и различия между ними на итоговый результат не влияли.

В таблице 2 приведены данные о средней скорости личинок в изучаемых растворах во время проведения LMR-теста.

Таблица 2. – Средние значения скорости личинок *Danio rerio* для световой и темновой фаз LMR-теста

Группа	Средняя скорость для разных фаз LMR \pm SE	
	Свет, мм/с	Темнота, мм/с
Контроль	0,280 \pm 0,012	0,283 \pm 0,031
Католит	0,235 \pm 0,012	0,304 \pm 0,031
Анолит	0,619 \pm 0,022	0,796 \pm 0,043

Примечание – SE – стандартная ошибка среднего

Как видно из данных, представленных в таблицах 1 и 2, несмотря на значительное повышение средней скорости в анолите, нет четкой зависимости данного показателя от pH и ОВП, т.к. в католите наблюдается заметное снижение ОВП и повышение pH без видимых изменений скорости. Приведенные данные распределены не на основе нормального закона, что показано с помощью гистограммы, квантильного графика, а также проведения теста Шапиро-Уилка. Поэтому, чтобы установить, имеется ли взаимосвязь между типом используемого раствора и активностью эмбрионов, а также средней скоростью движения личинок, использовался непараметрический критерий Ньюмена, так как имеется три исследуемые группы. Статистический анализ при помощи данного критерия также не дал четких результатов о влиянии каждого из показателей на движение *Danio rerio* и лишь указал на статистическую достоверность очевидного факта повышения активности личинок в растворе анолита.

Поэтому, для поиска неочевидных взаимосвязей между показателями был применен метод автоматического обнаружения скрытых закономерностей на основе исследования свойств классов с помощью технологий машинного обучения [4]. Обучающая выборка была обработана и просмотрены пересечения всех исследуемых признаков. Произведена попытка разделения растворов на токсичные и нетоксичные по показателям, указанным в таблицах 1 и 2.

Однако по итогу анализа было показано, что на основе доступной обучающей выборки, невозможно достоверное определение токсичности раствора. Причина заключается в недостаточном количестве как самих признаков, так и числовых данных в каждом из них, что не позволяет разде-

лить исследуемые растворы на классы. Процент пересечения паттернов классов во всех случаях составляет 72-99%, что говорит о факте схожего влияния изучаемых растворов на эмбрионы и личинки *Danio rerio* и невозможности разделения их на классы как таковые. Подтверждено, что не наблюдается четкая зависимость токсичности раствора от конкретных показателей pH и ОВП, которые, по данным различных исследований [5] являются определяющими активностью водных растворов.

Заключение. Полученные результаты говорят о необходимости расширения количества изучаемых признаков электролитически обработанных водных растворов, что, в перспективе позволит определить механизм их воздействия на живые организмы, в том числе, путем использования технологий машинного обучения. Также необходимо отметить, что дальнейшие исследования целесообразно направить в том числе и на получение достаточного массива данных по каждому параметру для построения адекватной обучающей выборки.

Список использованных источников

1. Шикунец, А.Б. Оценка эмбриотоксичности электролитически обработанных водных растворов на примере модели *Danio rerio* / А.Б. Шикунец, В.Н. Штепа, Д.А. Каспирович // Научный потенциал молодежи – будущему Беларуси : материалы XVII международной молодежной научно-практической конференции, Пинск, 14 апреля 2023 г. : в 2-х ч. / Министерство образования Республики Беларусь [и др.] ; редкол.: В.И. Дунай [и др.]. – Пинск : ПолесГУ, 2023. – Ч. 2. – С. 305-307.

2. Шикунец, А.Б. Эмбриотоксичность водных растворов после их электролиза / А.Б. Шикунец, В.Н. Штепа, Д.А. Каспирович // Инжиниринг: теория и практика : материалы III международной научно-практической конференции, Пинск, 28 апреля 2023 г. / Министерство образования Республики Беларусь [и др.] ; редкол.: В.И. Дунай [и др.]. – Пинск : ПолесГУ, 2023. – С. 80-83.

3. Барулин, Н. В. Современные методы использования данио рерио (*zebrafish*) для оценки нейротоксичности химических веществ / Н. В. Барулин // Актуальные проблемы и инновации в современной ветеринарной фармакологии и токсикологии : материалы VI Международного съезда ветеринарных фармакологов и токсикологов ЕАЭС, посвященного 90-летию со дня рождения профессора В. Д. Соколова (г. Витебск, 9-11 июня 2022 г.) / Витебская государственная академия ветеринарной медицины [и др.]. – Витебск : ВГАВМ, 2022. - С. 11-15.

4. Распознавание на основе синтеза паттернов классов / В. В. Краснопрошин, А. В. Карканица, В. Г. Родченко // Информационные системы и технологии = Information Systems and Technologies [Электронный ресурс] : в 3 ч. Ч. 2 : материалы Междунар. науч. конгресса по информатике, Минск, 27-28 окт. 2022 г. – Минск : БГУ, 2022. – С. 144-150.

5. Исследование влияния водных растворов с модифицированным окислительно-восстановительным потенциалом на аквакультуру / А. Н. Коржов, [и др.] // Сборник трудов конференции «Физика водных растворов». – 2022. - №5. – С. 45.