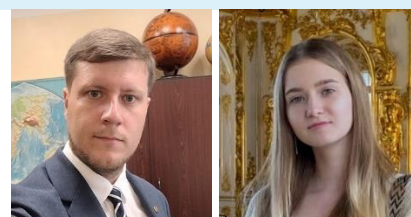


Геоинформационный портал как инструмент анализа пространственно-временных данных и экологического мониторинга озера Плещеево

Е.А. Борисова^{1*}, Г.И. Загребин^{1**}

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

* Madam.borisovakate@yandex.ru, ** zagrebin@miigaik.ru



Ключевые слова геоинформационный портал, экологический мониторинг, геоинформационное картографирование, пространственно-временной анализ, гидрохимические показатели, визуализация загрязнений, машинное обучение

Аннотация В статье рассмотрена реализация геоинформационного портала, направленного на интеграцию и пространственно-временной анализ экологических данных в водосборе озера Плещеево. Новизна подхода заключается в объединении гидрохимических и гидрологических показателей с цифровыми инструментами визуализации, прогнозирования и машинного обучения в единой ГИС-среде. Разработанный портал использует современные веб-технологии и поддерживает отображение динамических карт, графиков, аналитических панелей и пользовательских запросов к данным. Описаны методы восстановления пропусков в временных рядах, оценки антропогенного воздействия. Показано применение пространственного анализа для оценки пересечений полигональных объектов, связанных с урбанизацией, природными территориями и инженерной инфраструктурой. Система ориентирована на широкое использование: от научных исследований до поддержки принятия решений в сфере экологии и территориального планирования. Портал демонстрирует потенциал масштабируемости и повторного использования в других регионах с учётом специфики локальных данных.

1 Введение

Мониторинг водных экосистем приобретает особую значимость в условиях нарастающей антропогенной нагрузки для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития. Рост промышленного и сельскохозяйственного производства, урбанизация и изменение климата приводят к увеличению объёмов загрязнений,

поступающих в водные объекты, что вызывает деградацию экосистем и ухудшение качества водных ресурсов.

Традиционные формы представления данных, такие как таблицы и статические отчёты, существенно ограничивают возможности анализа и принятия решений в сфере экологического мониторинга. Они не создают условия для интеграции разнородных пространственно-временных данных и моделирования сценариев развития экологической ситуации. Подобные ограничения подтверждаются практикой мониторинга уникальных экосистем, например, озера Байкал, где статические отчёты не обеспечили своевременного реагирования на кризисные изменения [1]. В этой связи все большую актуальность приобретают геоинформационные системы (ГИС), которые обеспечивают сбор, обработку, хранение и визуализацию пространственно-временных данных, интеграцию результатов полевых исследований, дистанционного зондирования и статистических источников. ГИС-технологии позволяют не только отображать текущие состояния экосистем на тематических картах, но и анализировать динамику изменений, выявлять зоны риска, моделировать распространение загрязнений и прогнозировать последствия различных сценариев развития [2].

Целью данной работы является создание геоинформационного портала, объединяющего различные источники данных и предоставляющего расширенные аналитические возможности для мониторинга водных экосистем. Такой портал служит не только хранилищем данных, но и сильным аналитическим инструментом, позволяющим исследователям и специалистам в области экологии принимать обоснованные решения на основе пространственно-временного анализа.

2 Материалы и методы

Геоинформационные системы (ГИС) представляют собой аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие сбор, хранение, обработку и визуализацию пространственных данных. Основные принципы построения таких систем включают:

- Открытость — возможность включения новых источников и методов сбора данных;
- Согласованность — обеспечение соответствия объёма и качества данных возможностям их обработки и использования для принятия решений.

Геоинформационный подход к экологическому мониторингу позволяет связывать экологические показатели с их пространственным положением, что обеспечивает мониторинг и прогнозирование динамики состояния водных экосистем во времени и пространстве, построение тематических карт и моделирование природных и антропогенных процессов. Функциональные возможности, которые следует заложить в основу построения ГИС для экологического мониторинга, должны обеспечивать

комплексный, своевременный и точный анализ состояния окружающей среды с учётом пространственно-временных аспектов:

- 1) Интеграция разнородных данных в единую информационную среду;
- 2) Пространственная привязка и визуализация тематических данных;
- 3) Анализ временных и пространственных данных;
- 4) Поддержка принятия решений и прогнозирование;
- 5) Автоматизация сбора, обработки и обновления данных;
- 6) Масштабируемость и гибкость.

Для анализа данных применялся метод картографического моделирования, используемого для визуализации количественной и пространственной характеристик загрязнений. Анализ временных рядов при помощи метода интерполяции позволял выявлять тренды и сезонные колебания ключевых экологических параметров. Совмещение различных слоёв данных обеспечивало комплексное понимание состояния экосистемы.

Для отображения в сети «Интернет» пространственных данных, собранных и объединенных в геоинформационной системе, был разработан геопортал [3], объединяющий в себе удаленную базу данных и интернет-страницу с их картографическим отображением. В геопортале использовались следующие виды пространственных данных: гидрохимические показатели (концентрации загрязняющих веществ, показатели качества воды), гидрологические параметры (уровни и расход воды), а также пространственные объекты — водосборные бассейны, административные границы и карты, отражающие изменения населенных пунктов во времени. Хранение и управление данными осуществлялись с помощью реляционной базы данных MySQL, что обеспечило эффективное хранение пространственных объектов и атрибутивных данных. Структура базы данных включала тематические таблицы с информацией о точках наблюдений, параметрах проб, гидрологических данных и пространственных слоях, связанных между собой через ключи для обеспечения целостности и возможности комплексных запросов.

Разработанный геоинформационный портал реализован в виде одностраничного веб-приложения, использующего технологии клиент-серверной архитектуры и современные веб-библиотеки для визуализации пространственных данных. Основу фронтенд-компонента составляет библиотека Mapbox GL JS, обеспечивающая высокопроизводительное отображение векторных тайлов и интерактивную работу с геопространственной информацией в браузере. В качестве базовых технологий использованы HTML5, CSS3 и JavaScript.

Клиентская часть портала представляет собой совокупность модулей, реализующих:

- динамическую загрузку и отображение векторных и растровых слоёв;
- подключение пользовательских источников данных (GeoJSON, CSV);

- реализацию интерактивных фильтров, выпадающих списков, слайдеров и элементов управления видимостью слоёв;
- генерацию всплывающих окон и информационных панелей на основе атрибутивных данных объектов;
- подключение интерактивной легенды, обновляющейся в зависимости от включённых слоёв.

Обработка данных осуществляется в браузере с помощью нативных методов JavaScript и специализированных библиотек, в частности:

- Turf.js — для геометрических операций (вычисление площади, пересечений, буферных зон и др.);
- D3.js / Plotly.js — для визуализации временных рядов, построения графиков и диаграмм;
- jQuery — для работы с DOM и AJAX-запросами.

Обработка запросов к данным осуществляется через набор серверных API-интерфейсов, реализованных с использованием PHP. Сервер предоставляет:

- доступ к хранилищу пространственных и табличных данных (в формате GeoJSON, CSV, JSON);
- выполнение агрегирующих функций по показателям загрязнений (например, расчёт общего объёма загрязнителя по году и точке);
- подгрузку метаданных и атрибутивной информации для всплывающих окон и аналитических панелей.

Таким образом, описанные выше методы и инструменты обеспечивают создание масштабируемой и гибкой геоинформационной системы, способной интегрировать разнообразные экологические данные, проводить их пространственно-временной анализ и визуализацию, что существенно повышает эффективность мониторинга и управления водными экосистемами.

На данном этапе в геоинформационной системе озера Плещеево реализованы два взаимодополняющих модуля визуализации и анализа:

- пространственное отображение гидрохимических параметров по точкам взятия проб;
- временной анализ уровня воды по многолетним наблюдениям.

Оба инструмента интегрированы в веб-интерфейс портала и взаимодействуют с серверной частью через асинхронные запросы и динамически подгружаемые слои.

2.1 Геоинформационное представление гидрохимических данных

Для пространственного отображения и анализа результатов гидрохимических проб водных объектов был разработан специализированный веб-модуль на основе библиотеки Mapbox GL JS, обеспечивающий интеграцию, визуализацию и пользовательское взаимодействие с данными экологического мониторинга. Гидрохимическая информация формируется на основе полевых и лабораторных измерений и сохраняется в базе данных, структурированной для выполнения многомерного анализа. Архитектура базы данных включает таблицы с уникальными идентификаторами точек наблюдения, географическими координатами, временными метками, типами загрязняющих веществ, концентрациями и указанием источников данных. Функция модуля реализует динамическое подключение и отображение пространственно-временных показателей качества воды. Пользовательский интерфейс позволяет выбирать интересующий химический параметр (например, фосфаты, БПК, pH) и год наблюдений, после чего данные автоматически обновляются без перезагрузки страницы. Таким образом, модуль обеспечивает интерактивный анализ и наглядную интерпретацию гидрохимических данных, способствуя принятию обоснованных решений в области экологического мониторинга.

2.1.1 Графическая реализация

В основу картографической визуализации положен динамически подключаемый источник GeoJSON, загружаемый с серверной части посредством AJAX-запроса с параметром химического индикатора (например, «фосфаты», «pH», «железо» и др.). Источник данных обновляется при каждом изменении выбора пользователем через графические элементы интерфейса (рис. 1) — выпадающий список показателей (<select>) и ползунок для выбора года (<input type="range">).

Данные представлены в двух слоях:

— Слой (тип: circle) отображает точки взятия проб.

Радиус кругов масштабируется по значению AvgPDK — отношения среднего показателя к предельно допустимой концентрации (ПДК), в диапазоне от 10 до 35 пикселей. Цветовая шкала реализована в виде пороговой схемы, которая отражает качественную категорию состояния: до 0.86 ПДК — зелёный, от 0.86 до 1.14 ПДК — жёлтый, выше 1.14 ПДК — оранжевый. Выбранные диапазоны соответствуют ошибке измерения при проведении анализов.

— Слой (тип: symbol) содержит подписи, включающие значение AvgPDK и, при наличии, — суммарный объём загрязняющего вещества за год (SumPol), в тоннах).

При отсутствии суммарного значения отображается только «Среднее к ПДК». Формат подписи (рис. 2).

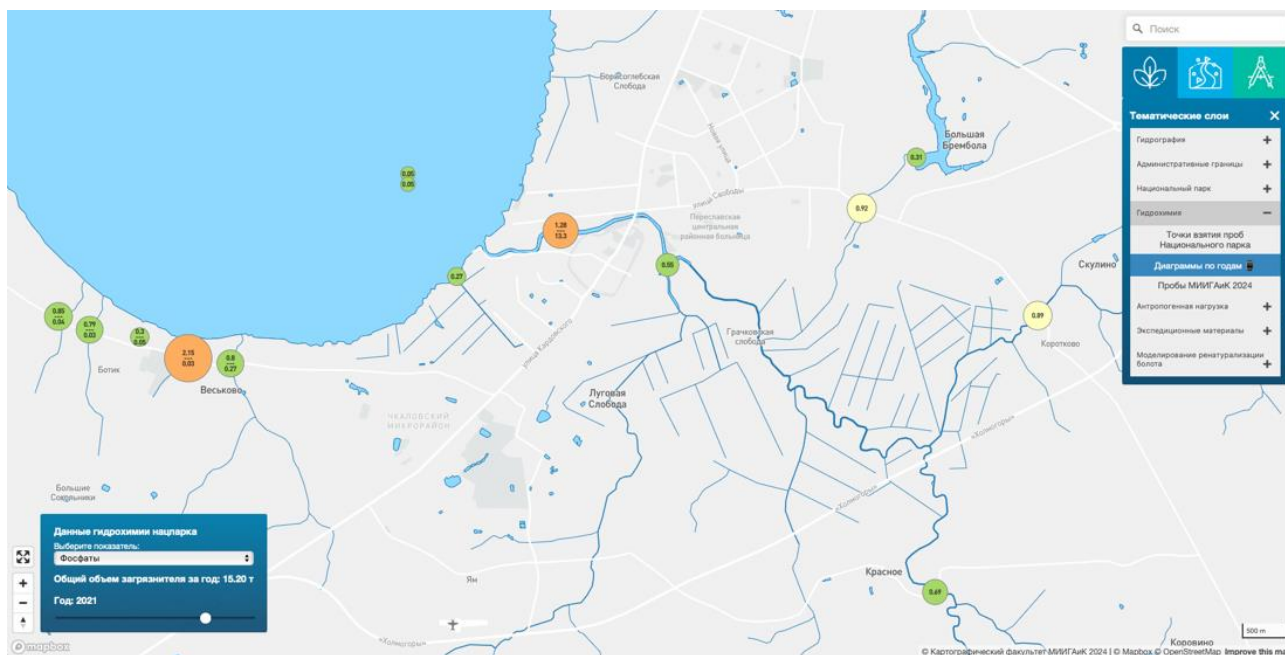


Рис. 1. Интерфейс с визуализацией гидрохимических данных

Fig. 1. Interface for hydrochemical data visualization



Рис. 2. Картографическая визуализация пространственно-временного описания гидрохимии

Fig. 2. Cartographic visualization of the spatial and temporal description of hydrochemistry

2.1.2 Интерактивные функции

При клике на карту по точке мониторинга активируется всплывающее окно с полной информацией (рис. 3):

- название контрольной точки,
- год наблюдения,
- среднее и максимальные значения загрязнителя,

- отношение к ПДК,
- значение ПДК,
- суммарный объём загрязнения (если доступен).

Также отображается мини-график тренда по годам для выбранного показателя, генерируемый с помощью функции `diagram_paint`.



Рис. 3. Атрибутивная информация точки мониторинга гидрохимических показателей

Fig. 3. Attribute information of the hydrochemical indicators monitoring point

2.2 Геоинформационное представление гидрологических данных

Для отображения изменений уровня воды озера за период 1932–2024 гг. разработан модуль визуализации временных рядов, основанный на библиотеках `Plotly.js` и `D3.js`. Источник данных — CSV-файл с полями Год и Уровень воды (в сантиметрах), загружаемый через асинхронно `d3.csv()`, что обеспечивает высокую отзывчивость интерфейса и возможность повторного использования данных при переключении параметров отображения.

На этапе загрузки данные проходят предварительную очистку и трансформацию:

```
var years = xData.map(year => parseInt(year, 10));  
var waterLevels = ylevel.map(level => parseFloat(level));
```

Данный шаг исключает некорректные строки и преобразует значения в числовой формат, необходимый для регрессионного анализа и построения графиков.

2.2.1. Алгоритмы анализа

Для оценки тренда уровня воды в ключевой исторический период (1959–1975 гг.) применяется метод наименьших квадратов, реализованный вручную на JavaScript без привлечения сторонних статистических библиотек:

```
function leastSquares(xSeries, ySeries) {  
  var xBar = d3.mean(xSeries);  
  var yBar = d3.mean(ySeries);  
  var ssXX = d3.sum(xSeries, d => Math.pow(d - xBar, 2));  
  var ssXY = d3.sum(xSeries, (d, i) => (d - xBar) * (ySeries[i] - yBar));  
  var slope = ssXY / ssXX;  
  var intercept = yBar - (xBar * slope);  
  return { slope, intercept };  
}
```

Результирующая модель линейной регрессии (уравнение прямой) применяется для генерации массива прогнозных значений, формирующих трендовую линию на графике. Дополнительно реализована функция усреднения уровней воды по произвольно заданным временным диапазонам:

```
function averageWaterLevel(startYear, endYear) {  
  var filteredLevels = waterLevels.filter((level, i) => years[i] >= startYear && years[i] <= endYear);  
  return d3.mean(filteredLevels);  
}
```

С помощью этой функции рассчитываются среднемноголетние значения уровня воды для четырёх ключевых периодов: 1932–1959, 1960–1975, 1976–2024, 1932–2024.

2.2.2 Графическая реализация

Для построения визуального представления используется массив объектов `trace`, каждый из которых представляет отдельный слой на графике:

- Основная линия (`trace1`) — динамика уровня воды по годам;
- Трендовая линия (`trace2`) — линия регрессии 1959–1975 гг.;
- Горизонтальные линии (`trace3–trace6`) — среднемноголетние уровни воды для разных периодов.

Каждый слой содержит параметры типа (`scatter`), режима (`lines`), цвета и стиля линии (сплошная, пунктирная, точечная и пр.).

```
var trace2 = {  
  type: "scatter",  
  mode: "lines",
```

```
x: filteredYears_trend,  
y: trendLine,  
name: 'Линия тренда',  
line: { color: 'red', dash: 'dashdot' }  
};
```

Масштабирование по оси времени реализовано через встроенный `rangeslider`, а временной выбор осуществляется при помощи `rangeselector` с предопределёнными кнопками (1, 5, 15, 30 лет, весь период). График динамики уровня воды в озере представлен на рисунке 4.



Рис. 4. График динамики уровня воды в озере Плещеево
Fig. 4. Graph of water level dynamics in Lake Pleshcheyevo

Для улучшения доступности реализовано интерактивное справочное окно, вызываемое по кнопке, с описанием действий по управлению ползунками и интерпретации данных. Оно формируется средствами `Marbox GL` и позиционируется относительно управляющего элемента интерфейса. Для сенсорных экранов добавлена поддержка жестов свайпа, позволяющая скрывать или раскрывать боковую панель с графиком уровня воды. Это повышает эргономику работы на устройствах с ограниченным экраном. Также предусмотрено программное управление `resize` графика при изменении размеров контейнера или ориентации экрана.

Таким образом, реализованные модули обеспечивают комплексный подход к визуализации гидрологических и гидрохимических данных в пространственно-временной

структуре, повышая информативность и наглядность экологического мониторинга водосбора.

2.3 Применение методов машинного обучения для восстановления пропусков в гидрологических данных

Одной из задач при обработке временных рядов уровня воды озера Плещеево стала корректная реконструкция недостающих значений, связанных с неполнотой архивных наблюдений. В процессе первичной обработки было выявлено, что прямое заполнение пропусков с помощью стандартных методов может приводить к завышенной оценке качества ($MAE = 0$, $RMSE = 0$, $R^2 = 1$), что зачастую связано с утечкой информации или некорректным подходом к валидации. Для достоверной оценки качества восстановления был реализован подход внешней валидации с контролем истинных (неиспорченных) значений. Основная идея заключается в следующем:

1. исходные данные сохраняются в виде "эталонного" датафрейма без пропусков;
2. создаётся модифицированная версия с искусственными пропусками (например, замена нулевых значений на NaN);
3. заполнение выполняется разными методами, после чего восстановленные значения сравниваются с исходными истинными.

2.3.1 Алгоритмы анализа

В работе протестированы четыре метода:

- Среднее по другим годам: простая агрегация по одной точке, исключая текущий год.
- Линейная регрессия: построение модели зависимости значения от года.
- Метод ближайших соседей (KNN): восстановление на основе схожести временных рядов.
- Случайный лес: ансамблевый метод регрессии с использованием временной переменной.

Метод 1: среднее по другим годам

Реализация машинного обучения для восстановления пропусков в гидрологических данных:

Сделаем копию данных для работы с пропусками

```
df = df_full.copy()
```

Заменим значения на NaN

```
df[month_cols] = df[month_cols].replace(0, np.nan) # Заменим 0 на NaN в месячных данных
```

Заполнение методом 1: среднее значение по другим годам

```
def fill_with_mean(df):
    df_filled = df.copy()
    for point in df['point'].unique():
        group = df[df['point'] == point]
        for col in month_cols:
            for idx, row in group.iterrows():
                if pd.isna(row[col]):
                    same_point_month = group[group['year'] != row['year']][col]
                    if same_point_month.notna().any():
                        df_filled.at[idx, col] = same_point_month.mean()
                    else:
                        df_filled.at[idx, col] = group[col].mean(skipna=True)
    return df_filled
```

Метод 2: линейная регрессия

```
def fill_with_lin_regression(df):
    df_filled = df.copy()
    for point in df['point'].unique():
        point_data = df[df['point'] == point]
        for col in month_cols:
            train_data = point_data[point_data[col].notna()]
            if len(train_data) > 1:
                X_train = train_data[['year']]
                y_train = train_data[col]
                model = LinearRegression()
                model.fit(X_train, y_train)
                missing_data = point_data[point_data[col].isna()]
                if len(missing_data) > 0:
                    X_missing = missing_data[['year']]
                    predicted_values = model.predict(X_missing)
                    df_filled.loc[missing_data.index, col] = predicted_values
```

```
return df_filled
```

Метод 3: KNN

```
def fill_with_knn(df):  
    df_filled = df.copy()  
    imputer = KNNImputer(n_neighbors=5)  
    df_filled[month_cols] = imputer.fit_transform(df[month_cols])  
    return df_filled
```

Метод 4: случайный лес

```
def fill_with_random_forest(df):  
    df_filled = df.copy()  
    for col in month_cols:  
        train_data = df[df[col].notna()]  
        missing_data = df[df[col].isna()]  
        if len(train_data) > 0:  
            X_train = train_data[['year']]  
            y_train = train_data[col]  
            model = RandomForestRegressor(n_estimators=100, random_state=42)  
            model.fit(X_train, y_train)  
            X_missing = missing_data[['year']]  
            predicted_values = model.predict(X_missing)  
            df_filled.loc[missing_data.index, col] = predicted_values  
    return df_filled
```

2.3.2 Результаты и выбор метода

Для всех четырёх подходов были рассчитаны значения MAE, RMSE и коэффициента детерминации R^2 . Это позволило объективно сравнить методы между собой и выбрать наилучший по соотношению точности и устойчивости (табл. 1).

Отсутствующие данные за отдельные годы восстановлены с помощью линейной регрессии, реализованной в Python (SciKit-Learn). Модель обучается на существующих наблюдениях по данной точке и параметру, затем применяется для заполнения промежутков. Это позволяет сохранить непрерывность временного анализа, а также обеспечивает отображение прогнозной траектории изменения показателя.

Таблица 1. Сравнение метрик по моделям обучения
Table 1. Comparison of metrics by learning models

Метод/ метрики	Среднее по другим годам	Линейная регрессия	KNN	Случайный лес
MAE	0.962774396	0.909890834	1.907641562	35.130319794
RMSE	6.506682465	6.373040996	8.728370163	104.121858157
R ²	0.999983932	0.999984228	0.999969373	0.995641669

Для каждого параметра в пределах конкретной станции строится линейная регрессионная модель на основе соседних точек. Процесс включает:

- нормализацию временных данных;
- удаление выбросов (если необходимо);
- обучение модели линейной регрессии `LinearRegression()`;
- предсказание значений для пропущенных интервалов;
- сохранение восстановленных значений в отдельную таблицу (`interpolated_values`), с возможностью их отключения при отображении.

Таким образом, применение машинного обучения в рамках восстановления пропусков обеспечило надёжность анализа и повышение точности выводов.

2.4 Анализ пересечения полигональных слоёв в задачах экологического мониторинга

В рамках платформы реализован инструмент пространственного анализа пересечений между полигональными слоями на карте. Его задача — вычисление площадей объектов и площади их пересечений с отображением относительных показателей в процентах. Использование библиотеки `Turf.js` позволяет выполнять точные операции над геометриями прямо в браузере.

2.4.1 Принцип работы инструмента

Пользователь выбирает два слоя из списка полигональных объектов, визуализированных на карте (тип `fill`). После выбора система выполняет:

- расчет площади каждого слоя в квадратных километрах;
- поэлементный перебор геометрий меньшего слоя и проверку их пересечений с объектами второго слоя:

```
const smallerLayer = area1 < area2 ? features1 : features2;
```

```
const largerLayer = area1 >= area2 ? features1 : features2;
```

- определение площади пересечения слоёв;

— отображение площади пересечения и процента перекрытия.

Результат отображается в интерфейсе (рис. 5) в виде текстового блока с ключевыми цифрами (в км² и %).

Преимущества реализации:

- учитывается мультигеометрия (через featureCollection);
- обеспечивается автоматическая защита от ошибок: отсутствие данных, одинаковые слои, пустые выборки;
- обеспечивается гибкость: можно адаптировать под любые тематические полигональные слои.

Экологическое значение инструмента и сценарии его применения: может быть использован для оценки воздействия загрязнителей на природные охраняемые объекты, контроля урбанизации, моделирования конфликтов природопользования. Таким образом, функция анализа пересечений полигональных слоёв служит не только удобным визуальным инструментом, но и важной аналитической основой для обоснованных выводов в сфере охраны окружающей среды и устойчивого природопользования.



Рис. 5. Интерфейс инструмента пространственного анализа пересечений
Fig. 5. Interface of the intersection spatial analysis tool

3 Функциональные возможности геоинформационного портала

Разработанный геоинформационный портал служит платформой для интеграции, анализа, визуализации и интерпретации пространственных и атрибутивных данных в рамках экологического мониторинга водосборного бассейна озера Плещеево.

3.1 Основные группы данных и слоёв

3.1.1 Гидрографические слои

Портал отображает основные элементы водной сети и гидротехнической инфраструктуры:

- векторные полигоны водосборных бассейнов,
- линейные объекты речной сети,
- точечные слои гидросооружений (дамбы, плотины и др.).

3.1.2 Гидрохимический мониторинг

Реализована визуализация данных химического анализа воды в разрезе годов и загрязнителей. Представление выполнено в виде картодиаграмм, в которых:

- цвет кружков отражает качественную категорию состояния,
- размер соответствует интенсивности загрязнения по выбранному показателю,
- элементы управления позволяют фильтровать отображение по году и веществу в реальном времени,
- при клике на точку отображается подробная информация, включая расчёт общего годового объёма загрязнителя в тоннах, вычисляемого на основе концентрации и объёма воды, переносимого в данной точке за год.

3.1.3 Сток воды в контрольных точках

Результаты измерений стока воды по годам в местах отбора проб отображаются в виде диаграмм, масштабируемых пропорционально значению, с привязкой к географическим координатам. При наведении курсора на точку на карте отображается граница водосборного бассейна контрольной точки.

3.1.4 Административное-территориальное деление

Включены слои административных границ:

- субъектов федерации (области),
- муниципальных округов,

— населённых пунктов (города).

Эти слои используются для сопоставления природных и антропогенных процессов в пределах административных единиц.

3.1.5 Функциональное зонирование и рекреационное развитие

Отдельным блоком реализовано интерактивное отображение пространственной структуры Национального парка «Плещеево озеро» и атрибутивной информации, включая:

- функциональные зоны,
- зоны планируемого рекреационного развития,

3.1.6 Антропогенная нагрузка

Блок антропогенных воздействий представлен следующими слоями:

- динамику урбанизированных территорий за 2000, 2010 и 2020 гг.,
- векторные объекты промышленных предприятий с атрибутивной информацией,
- слои инженерной инфраструктуры: канализационные сети и зоны перспективного благоустройства.

3.1.7 Экспедиционные материалы

Геопортал включает маршруты полевых исследований, отображаемые линейными объектами, а также точки обследований притоков р. Трубеж, на которые реализованы всплывающие окна:

- при наведении отображается краткая информация о маршруте,
- при клике — результаты обследований и фотографии, привязанные к конкретным координатам.

3.1.8 Моделирование обводнения Берендеева болота

Реализован динамический слой, отображающий потенциальные зоны затопления болотной системы Берендеево болото. Регулируемый слайдер высот позволяет интерактивно оценивать сценарные последствия изменения уровня и уязвимость территорий.

3.1.9 Базовые подложки и картографическая основа

Для повышения информативности визуализации предусмотрены различные картографические подложки:

- базовая топографическая подложка ЕЭКО,
- мозаика спутниковых снимков,
- архивные картографические материалы (фонд города Переславль-Залесский).

3.1.10 Инструментальная панель пространственного анализа

Геопортал оснащён инструментарием пространственной аналитики, включающим:

- интерактивные линейки и планиметрию для расчёта расстояний и площадей,
- построение буферных зон заданного радиуса от точечных объектов,
- режим «картографической шторки» (map swipe) для сравнительного анализа изображений и векторных слоев,
- инструмент оценки расчёта площади перекрытия между двумя выбранными слоями с определением процентного соотношения.

Все условные обозначения, используемые в слоях, динамически отображаются в легенде по мере активации соответствующего слоя, что делает интерфейс адаптивным и интуитивно понятным.

Важной особенностью разработанного геоинформационного портала является реализация мультимасштабного подхода к отображению данных, обеспечивающего логичное и последовательное представление информации при переходе между различными уровнями детализации. Для каждого масштаба предусмотрена оптимизированная структура отображаемых слоёв, включая генерализацию, фильтрацию и адаптацию картографического содержания. Такой подход способствует повышению информативности визуализации, снижению когнитивной нагрузки на пользователя и улучшению навигационного взаимодействия. Мультимасштабное картографирование требует осознанного подбора проекций и содержания карты на каждом уровне отображения, что позволяет обеспечить устойчивость и логичность картографического интерфейса веб-приложений, а также повысить удобство восприятия пространственной информации пользователем [4].

Таким образом, геоинформационный портал представляет собой многофункциональный инструмент интеграции полевых, лабораторных и пространственных данных, моделирования и визуализации, обеспечивая поддержку управленческих, исследовательских и проектных задач в области природопользования и охраны водных ресурсов.

4 Обсуждение. Перспективы развития геоинформационного портала

Представленная реализация геоинформационного портала продемонстрировала эффективность комплексной интеграции разнородных данных для целей экологического

мониторинга водосборных территорий. Использование современных веб-картографических библиотек позволило обеспечить интерактивность пользовательского интерфейса и гибкости в настройках визуализации.

В развитии системы представляются перспективными следующие направления:

- расширение аналитических функций для моделирования и прогнозирования сценариев изменения экологической обстановки водосборного;
- интеграция методов машинного обучения и искусственного интеллекта для повышения точности анализа, заполнения пробелов в данных и построения прогностических моделей изменения состояния водных экосистем;
- интеграция автоматизированных источников данных, таких как IoT-устройства, сенсоры и гидрологические посты с передачей информации в реальном времени;
- создание открытых API для обмена данными между исследовательскими организациями, государственными органами и иными ГИС-системами;
- расширение функционала платформы для поддержки междисциплинарных исследований;
- обеспечение масштабируемости как по территориальному охвату (применение для других объектов и водосборных бассейнов), так и по спектру обрабатываемых данных.

Ключевым направлением исследований на следующем этапе проекта является моделирование и оценка сценариев экологической трансформации бассейна озера Плещеево при обводнении болотной системы Берендеево болото и проточности озера. Учитывая сложное геоморфологическое строение данной территории, предполагается реализация гидродинамического моделирования с прогнозной оценкой пространственно-временных изменений: уровня воды, масштабов затопления, миграции загрязняющих веществ, воздействия на прибрежные биотопы и транзитные водотоки. Ожидается, что моделирование позволит оценить не только экологические риски, но и потенциальные экосистемные выгоды от регулирования гидрологического режима.

Также необходимо учитывать вызовы, связанные с обеспечением качества исходных и оперативных данных, их верификацией и интеграцией из различных источников, а также гарантией надёжности работы портала при растущем числе пользователей. Безопасность доступа, адаптация интерфейса под пользователей с различной подготовкой и множества вариантов дисплеев могут стать значимыми направлениями повышения прикладной ценности платформы.

5 Выводы

Разработанный геоинформационный портал представляет собой эффективное связующее звено между сбором данных, их анализом, визуализацией и процессом принятия

решений. Его значимость проявляется в нескольких ключевых направлениях: поддержка полевых исследований, использование в образовательных программах и применение в прикладном природопользовании. Кроме того, портал обладает высоким потенциалом для масштабирования и дальнейшего развития, что позволяет адаптировать его под новые задачи и расширять функциональные возможности.

Применённые в реализации портала методы геоинформационного анализа и визуализации соответствуют современным практикам построения систем экологического мониторинга, ориентированных на выявление экологических рисков в водосборных территориях и прилегающих регионах. Использование современных ГИС-технологий, а также динамическая загрузка и отображение пространственных слоёв в сочетании с интерактивными инструментами анализа, позволили значительно повысить информативность и оперативность экологического мониторинга по сравнению с традиционными статическими методами.

Геоportal обеспечивает:

- комплексное объединение разнородных данных (полевые, лабораторные, исторические, гидрологические) в единой информационной среде;
- пространственно-временной анализ загрязнителей с возможностью оценки превышения предельно допустимых концентраций и выявления зон риска;
- наглядную и интуитивно понятную визуализацию, включая масштабируемые легенды, интерактивные графики трендов, всплывающие окна с полной атрибутивной информацией и динамическое обновление слоёв;
- поддержку принятия решений за счёт инструментов пространственной агрегации, сравнения сценариев и прогнозирования изменений состояния экосистем.

Внедрение подобных геоинформационных платформ открывает новые возможности для комплексного мониторинга, анализа и управления водными ресурсами на региональном и национальном уровнях. Благодаря интеграции многомерных данных и современных методов визуализации, становится возможным:

- своевременно выявлять негативные тенденции в состоянии водных объектов;
- проводить более точную оценку эффективности природоохранных мероприятий;
- моделировать последствия различных сценариев антропогенного воздействия и климатических изменений.

В будущем развитие таких систем может привести к формированию единой цифровой среды для поддержки принятия решений в области охраны окружающей среды, автоматизации мониторинга и прогнозирования, а также к повышению экологической грамотности и вовлечённости населения в вопросы устойчивого природопользования. В долгосрочной перспективе это будет способствовать устойчивому развитию, сохранению

биоразнообразия и формированию цифровой среды для поддержки принятия решений в области охраны окружающей среды.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации исследовательского проекта «Интеллектуальный хранитель наследия «Плещеево озеро» при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» <https://rgo.ru/>

Библиография

1. Зайцева Н. В., Климова И. Д., Карташов А. В., Жарова Т. И. Цифровые технологии в экологическом мониторинге: перспективы и вызовы // *Environmental Research*. 2021. Т. 202. Art. № 111715.
DOI:10.1016/j.envres.2021.111715.URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8620454>
2. Солнцев И. Н. Геоинформационные технологии: Учебное пособие. – М.: ГИС-Технологии, 2010. 272 с.
3. Загребин, Г. И. Геопортал как средство хранения и поиска геопространственной информации в образовательной и научно-технической деятельности / Г. И. Загребин, А. В. Дворников // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 175-178. – EDN VVZYKX.
4. Загребин Г. И. Выбор оптимальных картографических проекций мультимасштабной карты // *Геодезия и картография*. 2025. № 4. С. 8–18.

Geoinformation Portal of Lake Pleshcheyevo as a Tool for Environmental Monitoring and Spatial and Temporal Data Analysis

Ekaterina A. Borisova^{1*}, Gleb I. Zagrebin^{1**}

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

* Madam.borisovakate@yandex.ru, ** zagrebin@miigaik.ru

Keywords Geoinformation portal, environmental monitoring, geoinformation cartography, spatial and temporal analysis, hydrochemical indicators, pollution visualization, machine learning

Abstract The article presents the implementation of a geoinformation portal designed for the integration and spatial and temporal analysis of environmental data within the watershed of Lake Pleshcheyevo. The novelty of the approach lies in combining hydrochemical and hydrological indicators with digital tools for

visualization, forecasting, and machine learning within a unified GIS environment. The developed portal utilizes modern web technologies and supports the display of dynamic maps, charts, analytical panels, and user-defined data queries. Methods for reconstructing missing values in time series and assessing anthropogenic impact are described. The portal also implements spatial analysis tools to evaluate intersections between polygonal features related to urbanization, natural areas, and engineering infrastructure. The system is designed for broad applicability—from scientific research to decision support in the fields of ecology and spatial planning. The portal demonstrates strong potential for scalability and reuse in other regions, taking into account the specificity of local data.

Acknowledgements

The study was carried out as part of the implementation of the research project "Intellectual Guardian of the Pleshcheyevo Lake Heritage" with the financial support of the All-Russian public organization «Russian Geographical Society», <https://rgo.ru/>