



# Концепция пространственно-временных явлений

Ю.В. Белышева<sup>1</sup>, О.Г. Гвоздев<sup>1</sup>✉, А.В. Матерухин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии,  
Москва, Россия

✉ gvozdev@miigaik.ru

**ЦИТИРОВАНИЕ** Белышева Ю.В., Гвоздев О.Г., Матерухин А.В. Концепция пространственно-временных явлений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 4. С. 70–82. DOI:10.30533/GiA-2025-023.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** пространственно-временные данные, обработка данных, комплексные явления, пространство-время

**АННОТАЦИЯ** Во множестве практически значимых задач, решение которых опирается на пространственно-временные свойства явлений, существенны не столько точно измеренные значения базовых показателей, фактов или пространственных отношений, сколько их интегральная, часто принципиально нестрогая характеристика. В тех областях, где деятельности свойственны такие задачи, сложилась практика интегрального представления последних в виде бинарных, балльных, категориальных и непрерывных шкал. В данной работе предлагается формальный аппарат пространственно-временных явлений, позволяющий учесть аспекты, связанные с ограниченной применимостью понятийных аппаратов базовых предметных областей, аспекты пространственной и временной неопределенности явлений, аспекты принципиально нестрогого определения практически значимых понятий. Предложена человеко-машиночитаемая нотация, основанная на грамматике языка программирования Python 3, позволяющая описывать пространственно-временные явления и потенциально способная служить основой для их автоматической идентификации и локализации. Приведен набор примеров применения данной нотации для определения явлений из области метеорологии. Предложенные построения позволяют унифицировать процессы обработки данных о локализации комплексных явлений в пространстве и времени, в том числе в условиях взаимодействия различных предметных областей.

# 1 Введение

Выбором, определяющим фундаментальные свойства любой информационной, а следовательно, и геоинформационной системы является установление принципов представления информации в ней. Применительно к автоматизированным (аппаратным, аппаратно-программным и программным) информационным системам этот выбор требует определения в том числе используемых машинных типов и структур данных и их соотношений с семантикой обрабатываемой информации.

В современной геоинформатике принято делить весь объем данных на два компонента: пространственный и атрибутивный. При этом репрезентация и обработка пространственного компонента хорошо изучены и формализованы для семейств векторных и растровых представлений. В то же время состав, структура и интерпретация атрибутивного компонента традиционно рассматриваются как исключительно предметно-зависимая часть, не относящаяся к области изучения геоинформатики, а теория и практика построения атрибутивного компонента сводятся к общим принципам, применимым для любых реляционных систем управления базами данных<sup>1,2</sup>.

На практике, однако, нередки случаи, в которых пространственные свойства объектов переносятся в их атрибуты. Наиболее распространенными являются переносы:

- 1) трехмерных свойств объекта в атрибуты двумерного объекта (например, высота здания, высота [глубина] точки рельефа, принадлежность к уровню многоуровневой транспортной развязки);
- 2) агрегированных свойств объекта или пространства вокруг объекта в атрибуты двумерного объекта (например, пороговая величина времени изохрон);
- 3) агрегированных трехмерных свойств объекта в атрибуты двумерного объекта (комбинация предыдущих случаев) (например, средняя высота [глубина] участка местности, описываемого полигоном).

Рассматривая вышеупомянутый пример изохрон, можно отметить, что значение пороговой величины времени изохроны, проходящей через данную точку пространства, не является ни свойством, присущим данной точке, ни свойством явлений в ней, ни свойствами точек пространства, окружающих ее, а выступает эмерджентным свойством окружающей области пространства с пространственными объектами и их атрибутами, а также некоторой функции от них, отражающей свойства и потребности потребителя информации.

В большом количестве практически значимых задач, решение которых так или иначе предполагает привлечение пространственных и пространственно-временных данных, а также инструментов пространственного (геоинформационного) анализа, существенными являются не точно измеренные значения физических величин или пространственных отношений, а их интегральная, часто принципиально нестрогая характеристика. Так, запрос «в пешей доступности от станции метрополитена» не может быть выражен в виде конкретных количественных требований. Более того, попытка выразить подобные запросы в строгой форме неизбежно приведет к потере важных деталей и, как следствие, ухудшению общего качества результата обработки запроса.

Аналогичную проблему можно отметить в отношении запроса «на маршруте имеются затруднения движения». Такое явление, как гололед (обледенение), может образовываться вследствие намерзания капель переохлажденной воды (дождя, мороси или тумана) либо при соприкосновении капель воды

1 Haerder T., Reuter A. Principles of transaction-oriented database recovery // ACM Computing Surveys. 1983. Vol. 15. No. 4. P. 287–317.

2 Kent W. A Simple guide to five normal forms in relational database theory // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26. P. 120–125.

с предметами, температура поверхности которых не превышает  $0^{\circ}\text{C}$ <sup>3</sup>. Это явление выступает примером единого результирующего состояния (представляющего интерес для практики), ставшего следствием различных процессов.

Наиболее часто для решения практически значимых задач ценностью представляет именно идентификация и пространственно-временная локализация явления, а не точные значения отдельных физических величин, необходимые для его идентификации. Более того, точность пространственно-временной локализации в этом случае намного важнее.

Цель данной работы — предложить формальный аппарат, расширяющий теоретический и прикладной инструментарий геоинформатики в части единого образного представления пространственно-временных сведений (и оперирования ими), полезность которых состоит в идентификации и пространственно-временной локализации явлений, но не в отдельных фактах и величинах, исходных для процессов идентификации и локализации.

## 2 Материалы и методы

### 2.1 Разработка формального аппарата пространственно-временных явлений

В данной работе предлагается формальный аппарат пространственно-временных явлений, представляющий собой попытку обобщить существующие теоретические построения и потребности практики. Под пространственно-временным явлением в рамках статьи понимается явление, полезность сведений о котором заключается главным образом в его пространственно-временной локализации. Таким образом, переход от множества исходных показателей к показателю некоторого пространственно-временного явления с точки зрения построения информационных систем — это абстрагирование сложности, присущей предметной области, в пользу обеспечения простоты и удобства анализа в пространственном или пространственно-временном домене. Уже упомянутые изохроны [1] являются ярким примером такого перехода, как и многие другие градостроительные метрики [2]. При изучении комплексных процессов и явлений, протекающих в пространстве и времени, вводятся индексы стабильности атмосферы<sup>4</sup> [3], индексы токсичности почвы [4, 5] и т. д. В практике метеорологических наблюдений активно применяются категориальные [6] (состояние подстилающей поверхности без снежного покрова и при наличии снежного покрова, структура и характер залегания снежного покрова, классификация ярусов и видов облачности) и балльные (степень покрытия неба облаками [10-балльная шкала, шкала METAR<sup>5</sup>], сила ветра [шкала Бофорта]<sup>6</sup>) системы кодирования<sup>3</sup>. Таким образом, становится очевидной общая тенденция к представлению данных о состоянии явлений в виде бинарных, категориальных или непрерывных шкал в  $[0; 1]$  либо в видах, легко приводимых к перечисленным. Предложенная концепция является попыткой унификации данных подходов для их дальнейшего применения в рамках аппарата пространственного анализа.

3 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. Вып. 3. Ч. 1. 297 с.

4 Mohan M., Siddiqui T.A. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification // Atmospheric Environment. 1998. Vol. 32. No. 21. P. 3775–3781.

5 METeoroological Aerodrome Report (METAR). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://awiacja.imgw.pl/pdf/metar-en.pdf> (дата обращения: 10.10.2024).

6 Huller S. Defining the wind: the Beaufort scale and how a 19th-century admiral turned science into poetry. New York: Crown Publishers, 2004. 290 p.

Среди опубликованных в открытых источниках исследований по смежным тематикам можно отметить следующие. В работе [7] предложена адаптация математического аппарата нестрогой логики для формализации пространственных запросов. В статье [8] детально проработаны вопросы изменчивости пространственных признаков во времени и ее учета в геоинформационной системе. В работе [9] предложен подход ко встраиванию знаний о пространственных и атрибутивных свойствах объектов в латентное признаковое пространство для их дальнейшей обработки с помощью моделей на основе искусственных нейронных сетей.

Ключевым отличием предлагаемой статьи от перечисленных является нацеленность на введение способа абстрагирования процессов представления данных потребителю и интегральной обработки данных различных предметных областей от процессов идентификации и локализации явлений, представляющих интерес.

## 2.2 Определение понятия пространственно-временного явления

Пространственно-временное явление — явление, для которого каждой точке пространства можно поставить в соответствие показатель пространственно-временного явления  $P(x)$  — совокупное значение трех предикатов:

- применимости  $P_A(x)$  (Применим ли понятийный аппарат, в котором определено явление в данной точке?);
- определенности  $P_D(x)$  (Достаточно ли данных для определения состояния явления в данной точке?);
- значения  $P_V(x)$  (Происходит ли явление в данной точке?).

При этом совокупное значение трех предикатов определяется по следующим правилам:

- 1) если предикат применимости  $P_A(x) = False$ , значение явления в данной точке *NotApplicable* («неприменимо»);
- 2) если предикат определенности  $P_D(x) = False$ , значение явления в данной точке *NotAvailable* («недоступно»);
- 3) если  $P_A(x) \wedge P_D(x)$ , значение явления в данной точке соответствует  $P_V(x)$ , где  $x$  — пространственное или пространственно-временное положение точки.

Таким образом, показатель пространственно-временного явления принимает значения из множества  $\{NotApplicable, NotAvailable, False, True\}$  ( $\{NAP, NAV, F, T\}$ ). Выполнение логических операций над данным множеством значений производится согласно таблицам истинности (табл. 1–3).

**Таблица 1** ⌵

Таблица истинности операции отрицания на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 1**

Truth table of negation on the values of the index of spatio-temporal phenomena

| ¬                    |                      |
|----------------------|----------------------|
| <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> |
| <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  |
| <i>False</i>         | <i>True</i>          |
| <i>True</i>          | <i>False</i>         |

**Таблица 2** ⌵

Таблица истинности операции конъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 2**

Truth table of conjunction on the values of the index of spatio-temporal phenomena

| ∧                    | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | <i>True</i>          |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> |
| <i>NotAvailable</i>  | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  |
| <i>False</i>         | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | <i>False</i>         |
| <i>True</i>          | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | <i>True</i>          |

**Таблица 3** ⌵

Таблица истинности операции дизъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 3**

Truth table of disjunction on the values of the index of spatio-temporal phenomena

| ∨                    | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | <i>True</i>          |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> |
| <i>NotAvailable</i>  | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  |
| <i>False</i>         | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | <i>True</i>          |
| <i>True</i>          | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>True</i>          | <i>True</i>          |

Данное построение можно рассматривать как расширение классической бинарной логики и как частный случай многозначной, в частности конечнозначной, логики (англ. many-valued logic, multiple-valued logic)<sup>7,8</sup>.

Явное выделение значений *NotApplicable* и *NotAvailable* необходимо как для обеспечения строгости (однозначности) при обработке, организации сбора и хранения данных, так и для рационализации вычислительных процессов, что возможно ввиду того, что точки со значениями *NotApplicable* и *NotAvailable* будут изменяться значительно реже, нежели точки, для которых значения определены.

## 3 Результаты и обсуждение

### 3.1 Обобщение для протяженных объектов

Предложенное определение применимо лишь к отдельным точкам пространства. Для его использования совместно с аппаратом пространственного анализа необходимо определить его обобщение для объектов, протяженных в пространстве и (или) времени.

В данном случае под объектами, протяженными в пространстве, понимаются общепринятые пространственные примитивы, определенные в рамках стандарта Open Geospatial Consortium Simple Feature Access<sup>9</sup>, а при включении в рассмотрение временной координаты к таковым можно отнести также одномерные объекты (точки).

Традиционной интерпретацией физических величин, выступающих атрибутами протяженных пространственных объектов, является их математическое ожидание в заданной площади или объеме и (или) за определенный временной интервал. Для логических величин оно будет соответствовать вероятности истинного значения.

Данное определение может быть применено непосредственно путем определения вероятности значения *True*. Однако такая операция приведет к потере сведений о значениях *NotApplicable* и *NotAvailable*, что может быть желательно в отдельных случаях, но не может считаться строгим и корректным способом обработки данных.

В связи с этим определим операцию вычисления математического ожидания показателя пространственного явления в виде следующих правил:

1. Если  $M(P_A M(P_A(x))) > T$ , где  $T$  — пороговое значение, следует считать результирующим значением *NotApplicable*.
2. Если  $M(P_A(x) \wedge P_D(x)) > T$ , следует считать результирующим значением *NotAvailable*.
3. Иначе следует считать результирующим значением  $M(P_V(x))$  для  $x$ , где  $\neg(P_A(x) \vee P_D(x))$ .

Таким образом, результаты вычисления  $M(P(x))$  будут находиться во множестве  $\{NotApplicable, NotAvailable, [0.0; 1.0]\}$ .

Пороговое значение  $T$  должно определяться в зависимости от особенностей предметной области, задачи, а также типа пространственного объекта, для которого производится расчет. Рекомендуемыми значениями  $T$  являются:

- 0,0 — наиболее строгий вариант;

7 Augusto L.M. Many-valued logics. A mathematical and computational introduction. London: College Publications, 2017. 340 p.

8 Bergmann M. An introduction to many-valued and fuzzy logic: semantics, algebras, and derivation systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 329 p.

9 Simple Feature Access. Part 1: Common Architecture. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ogc.org/publications/standard/sfa/> (дата обращения: 08.10.2024).

– 0,5 — компромиссный вариант между строгостью и сохранением данных.

Наиболее распространенными частными случаями типов объектов, для которых производится такой расчет, будут полигон (мультиполигон) и пиксел раstra. Полигональное представление используется в случаях, когда каждому полигону соответствует некая область пространства, важная с точки зрения предметной области: единица административно-территориального деления или землепользования, реже — области пространственно-временной эквивалентности, для которых предполагается относительно низкий разброс значений. В этом случае пренебрегать отдельными полигонами нежелательно, что подразумевает применение более разрешительных значений  $T$ . При использовании растрового представления, напротив, значениями отдельных пикселей, как правило, можно пренебречь в пользу общей полноты и корректности, а также минимизации «шумовых» значений.

Важно отметить, что в отечественной практике распространен более близкий к физике подход, основанный на использовании геопривязанных полей — геополей (англ. geofield), расширяющих понятие полей физических явлений, машинным представлением которых выступают растры на регулярной сетке. В зарубежной литературе используется более общий термин distribution map («карта распределения»), приближенный к практике географии и картографии, включающий в себя представления, основанные как на растрах, так и на полигонах.

Результатом объединения аппарата пространственных явлений с аппаратом геополей являются геополя пространственных явлений и временные ряды геополей пространственных явлений, а результатом объединения аппарата пространственных явлений с аппаратом карт распределения, в свою очередь, — карты распределения пространственных явлений и их временные ряды.

### 3.2 Обобщение для нечеткой логики

Как было показано во введении, корректное решение ряда практически значимых задач не может быть получено в рамках аппарата бинарной логики. Преодолению этого ограничения посвящено множество исследований, рассматривающих обобщения бинарной логики до бесконечнозначной логики<sup>10</sup> [10], предполагающей оперирование значениями на отрезке [0; 1]. Одним из таких обобщений, активно используемым в информатике и автоматизации, является нечеткая (англ. fuzzy) логика<sup>10</sup>.

Численно данный подход полностью совместим с предложенным. Учет значений *NotApplicable* и *NotAvailable* предлагается осуществлять путем введения таблиц истинности, представленных ниже (табл. 4–6).

Важно отметить, что существует множество трактовок значений, промежуточных между *False* = 0 и *True* = 1: частотная, используемая для описанного обобщения для протяженных объектов; байесовская, предполагающая оценку уверенности в истинности высказывания; нечеткая (из нечеткой логики), предполагающая оценку степени принадлежности значения некоторому множеству (лингвистической переменной), и др. Несмотря на их численную совместимость, нельзя вне конкретного частного случая говорить об их семантической эквивалентности или совместимости.

Исследование этого вопроса выходит за границы данной работы. В рамках предлагаемого обобщения в связи с необходимостью обеспечить совместимость с аппаратом пространственного анализа основной следует считать интерпретацию, предполагающую частотную трактовку вероятности. В случаях, для которых теоретически или эмпирически выявлена семантическая несовместимость с этой трактовкой, авторы предлагают исследовать возможности применения передаточных функций.

**Таблица 4** ▼

Таблица истинности операции отрицания на значениях показателя пространственно-временных явлений, обобщенная для нестрогой логики

**Table 4**

Truth table of negation on values of the index of spatio-temporal phenomena generalized for non-strict logic

| ¬                    |                      |
|----------------------|----------------------|
| <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> |
| <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  |
| <i>False</i>         | <i>True</i>          |
| (0; 1)               | 1 – x                |
| <i>True</i>          | <i>False</i>         |

10 Zadeh L.A. A fuzzy-set-theoretic interpretation of linguistic hedges // Journal of Cybernetics. 1972. Vol. 2. No. 3. P. 4–34.

**Таблица 5** 

Таблица истинности операции конъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений

**Table 5**

Truth table of conjunction on values of the index of spatio-temporal phenomena generalized for non-strict logic

| $\wedge$             | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | (0; 1)               | <i>True</i>          |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> |
| <i>NotAvailable</i>  | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  |
| <i>False</i>         | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | <i>False</i>         | <i>False</i>         |
| (0; 1)               | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | $xy$                 | $y$                  |
| <i>True</i>          | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | $x$                  | <i>True</i>          |

**Таблица 6** 

Таблица истинности операции дизъюнкции на значениях показателя пространственно-временных явлений, обобщенная для нестрогой логики

**Table 6**

Truth table of disjunction on values of the index of spatio-temporal phenomena generalized for non-strict logic

| $\vee$               | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | (0; 1)               | <i>True</i>          |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> | <i>NotApplicable</i> |
| <i>NotAvailable</i>  | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  | <i>NotAvailable</i>  |
| <i>False</i>         | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>False</i>         | $x$                  | <i>True</i>          |
| (0; 1)               | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | $y$                  | $x + y - xy$         | <i>True</i>          |
| <i>True</i>          | <i>NotApplicable</i> | <i>NotAvailable</i>  | <i>True</i>          | <i>True</i>          | <i>True</i>          |

### 3.3 Формализация способа описания пространственных и пространственно-временных явлений

Результативное использование предложенного теоретического аппарата невозможно без человеко-машиночитаемого способа записи — нотации, определяющей зависимость значения показателя пространственного явления в текущей точке от значений переменных в ней и ее окрестности.

В качестве синтаксической основы предлагается использовать язык программирования Python 3, в частности следующие его конструкции:

- 1) переменные;
- 2) выражения, включающие в себя:
  - вызовы функции, в том числе с именованными аргументами;
  - унарные и бинарные логические операторы;
  - арифметические операторы;
  - операторы сравнения.

Для удобства выполнения логических операций предлагается ввести функции:

- 1)  $\text{allof}(a, b, c, \dots)$  — обобщение операции И для произвольного числа аргументов;
- 2)  $\text{anyof}(a, b, c, \dots)$  — обобщение операции ИЛИ для произвольного числа аргументов.

Для обращения к значениям исходных переменных предлагается ввести следующие функции:

- 1)  $\text{exact}(X)$  — значение переменной  $X$  строго в текущей точке; принимает значение *NotAvailable*, если непосредственно в текущей точке значение отсутствует;
- 2)  $\text{nearest}(X, r = R, t\_past = T)$  — значение переменной  $X$  непосредственно в текущей точке либо ближайшее значение в пространстве на расстоянии, не превышающем  $R$ , не более чем на  $T$  ранее текущего момента времени; принимает значение *NotAvailable*, если подходящие значения отсутствуют;
- 3)  $\text{interpolate}(X, r = R, t\_past = T, n = N, \text{order} = \text{ORDER})$  — значение переменной  $X$  непосредственно в текущей точке либо значение, полученное путем интерполяции не более  $N$  известных значений, на расстоянии,

не превышающем  $R$ , не более чем на  $T$  ранее текущего момента времени; при этом порядок ORDER может принимать значение:

- 0 — выбор ближайшего значения (аналогично nearest);
  - 1 — применение билинейной интерполяции;
  - 2 — применение биквадратной интерполяции;
  - 3 — применение бикубической интерполяции;
- 4) `aggregate( X, spatial_window, temporal_window, operation )` — значение переменной  $X$ , агрегированное с помощью операции `operation` для пространственного окна, установленного параметром `spatial_window`, и временного окна, установленного параметром `temporal_window`, где `spatial_window` — функция, определяющая вес значения в зависимости от расстояния (или разности отдельных координат) до него, а `temporal_window` — функция, определяющая вес значения в зависимости от времени до него (от текущего момента в прошлое).

**Для обработки нестрогих логических значений предлагается ввести функции:**

- 1) `linear( left_condition, right_condition )` — построение кусочно-линейной функции вида

$$1 \quad f(x) = \begin{cases} 0, & x < left\_condition, \\ 1, & x > right\_condition, \\ \left( \frac{x-left\_condition}{right\_condition-left\_condition} \right), & left\_condition \leq x \leq right\_condition; \end{cases} \quad L$$

- 2) `trapezoidal( left_condition, left_center_condition, right_center_condition, right_condition )` — построение кусочно-линейной функции вида

$$2 \quad f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq left\_condition, \\ \left( \frac{x-left\_condition}{right\_condition-left\_condition} \right), & left\_condition < x < left\_center\_condition, \\ 1, & left\_center\_condition \leq x \leq right\_center\_condition, \\ \left( 1 - \frac{x-left\_condition}{right\_condition-left\_condition} \right), & right\_center\_condition < x < right\_condition, \\ 0, & x > right\_condition. \end{cases}$$

Практическое применение этой нотации базируется на формировании оптимизированных реализаций предикатов применимости, определенности и значения путем трансформации нотации в абстрактное синтаксическое дерево, выполнения символьных алгебраических преобразований над ним, трансформации полученных выражений в последовательности вычислительных операций, преобразуемых, в свою очередь, в байт-код виртуальной машины или непосредственно инструкции процессора.

### 3.4 Примеры применения нотации

В качестве примеров применения предлагаемой нотации можно рассмотреть формализацию ряда распространенных метеорологических явлений.

Для всех приведенных далее выражений определим:

```
# Функция вычисления среднего на расстоянии до 20 метров
от данной точки за последние 30 секунд:
around = lambda X: aggregate( X, meters( 20 ),
seconds( 30 ), average )
```

Например, опираясь на температуру и размер частиц, а также на интенсивность выпадения, можно определить дождь и морось<sup>11</sup> так, как указано

<sup>11</sup> Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Вып. 3. Ч. 1. 297 с.

**Таблица 7** 

Выражения для определения пространственно-временных явлений

**Table 7**

The expressions to define spatio-temporal phenomena

в строках 1–2 табл. 7. Аналогично, используя количество частиц на м<sup>3</sup>, можно установить различные виды интенсивности снегопада [11] (строки 3–6 табл. 7). Сложнее определить, можно ли назвать мокрым снегом явление, отличающееся наличием теплого приземного слоя воздуха<sup>12</sup> (строка 7 табл. 7). Еще более сложным для определения является отмеченный в начале работы гололед, поскольку его образование может протекать различными путями<sup>13</sup> [11] (строка 8 табл. 7).

На практике главной сложностью применения предложенной нотации является формализация явлений в терминах известной на данном этапе работы системы значений, что требует достаточно глубокого понимания предметной области и процессов получения измерений.

| Атмосферные осадки |                       | Выражение  |
|--------------------|-----------------------|--|
| 1.                 | Морось                | <code>allof( ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &gt; celsius( 0 ) ), ( around( mm( РазмерЧастиц ) ) &lt; mm( 0.5 ) ), ( around( mm_per_hour( Интенсивность ) ) &gt; mm_per_hour( 0.25 ) ), )</code>  |
| 2.                 | Дождь                 | <code>allof( ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &gt; celsius( 0 ) ), ( mm( 0.5 ) &lt; around( mm( РазмерЧастиц ) ) &lt; mm( 7.0 ) ), ( mm_per_hour( 0.25 ) &lt; around( mm_per_hour( Интенсивность ) ) &gt; mm_per_hour( 100 ) ), )</code>   |
| 3.                 | Снегопад. Слабый      | <code>allof( ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ), ( around( count( ЧастицНаМ3 ) ) &lt; 10 ), )</code>   |
| 4.                 | Снегопад. Средний     | <code>allof( ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ), ( 10 &lt; around( count( ЧастицНаМ3 ) ) &lt; 100 ), )</code>  |
| 5.                 | Снегопад. Сильный     | <code>allof( ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ), ( around( count( ЧастицНаМ3 ) ) &gt; 100 ), )</code>  |
| 6.                 | Снегопад              | <code>anyof( Снегопад.Слабый, Снегопад.Средний, Снегопад.Сильный, )</code>   |
| 7.                 | Мокрый снег           | <code>allof( Снегопад, ( aggregate( celsius( ТемператураВоздуха ), meters( 100 ) and Высота &lt; meters( 5 ), seconds( 60 ), avg ) &gt; 0 ), ( aggregate( celsius( ТемператураВоздуха ), meters( 100 ) and Высота &gt; meters( 30 ), seconds( 60 ), max ) &lt; 0 ), ( exact( celsius( ТемператураПоверхности ) ) &lt; celsius( 0 ) ), )</code>             |
| 8.                 | Гололед (обледенение) | <code>allof( ( exact( celsius( ТемператураПоверхности ) ) &lt; celsius( 0 ) ), anyof( allof( ( around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 0 ) ), ( around( celsius( ЖидкоеСостояниеЧастиц ) ) &gt; fraction( 0.75 ) ), # переохлажденная жидкость ), ( celsius( 0 ) &lt; around( celsius( ТемператураЧастиц ) ) &lt; celsius( 5 ) ), ), )</code> |

<sup>12</sup> Все о зимних осадках // Примгидромет: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://old.primgidromet.ru/news/vse\\_o\\_zimnih\\_osadkah](http://old.primgidromet.ru/news/vse_o_zimnih_osadkah) (дата обращения: 06.10.2024).

<sup>13</sup> Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1985. Вып. 3. Ч. 1. 297 с.

## 4 Выводы

Введение концепции пространственных и пространственно-временных явлений позволяет абстрагироваться от деталей отдельных предметных областей в пользу обеспечения простоты и удобства анализа в пространственном или пространственно-временном домене. Благодаря такой абстракции становится возможным разрабатывать общие методы анализа и применять их к явлениям и процессам, определенным в рамках предложенного аппарата. Более того, упрощается интеграция данных о пространственных явлениях, изучаемых различными областями науки.

Практическая значимость исследования состоит в приближении понятийного аппарата, в котором выражены результаты пространственного анализа, к потребностям практики. Кроме того, можно выдвинуть гипотезу о том, что применение современных методов машинного обучения, в том числе моделей на основе искусственных нейронных сетей, для предсказания агрегированных данных о пространственных явлениях вместо отдельных величин, необходимых для их определения, может обеспечить лучшие показатели качества и производительности при сравнимой или большей практической пользе. Дальнейшие работы авторов будут посвящены проверке этой гипотезы.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены в рамках государственного задания № FSFE-2022-0002 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### БИБЛИОГРАФИЯ

1. Dovey K., Woodcock I., Pike L. Isochrone mapping of urban transport: car-dependency, mode-choice and design research // *Planning Practice & Research*. 2017. Vol. 32. No. 4. P. 402–416. DOI:10.1080/02697459.2017.1329487.
2. Reis J.P., Silva E.A., Pinho P. Spatial metrics to study urban patterns in growing and shrinking cities // *Urban Geography*. 2016. Vol. 37. No. 2. P. 246–271. DOI:10.1080/02723638.2015.1096118.
3. DeRubertis D. Recent Trends in Four Common Stability Indices Derived from U.S. Radiosonde Observations // *Journal of Climate*. 2006. Vol. 19. No. 3. P. 309–323. DOI:10.1175/JCLI3626.1.
4. Котьяк П.А., Чебыкина Е.В., Воронин А.Н. и др. Изменение токсичности почвы под действием технологий возделывания культур // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. № 8(226). С. 25–33. DOI:10.53083/1996-4277-2023-226-8-25-33.
5. Kowalska J.B., Mazurek R., Gąsiorek M., et al. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420. DOI:10.1007/s10653-018-0106-z.
6. Zhang H., Casey T. Verification of Categorical Probability Forecasts // *Weather and Forecasting*. 2000. Vol. 15. No. 1. P. 80–89. DOI:10.1175/1520-0434(2000)015<0080:VOCPF>2.0.CO;2.
7. Koyuncu M. Intelligent fuzzy queries for multimedia databases // *International Journal of Intelligent Systems*. 2011. Vol. 26. No. 10. P. 930–951. DOI:10.1002/int.20507.
8. Moreira J., Duarte J., Dias P. Modeling and representing real-world spatio-temporal data in databases // *Proceedings of the 14th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2019)*, September 9–13, 2019, Regensburg. Saarbrücken/Wadern: Dagstuhl Publishing, 2019. P. 1–14. DOI:10.4230/LIPICs.COSIT.2019.6.
9. Zhao X., Zhang J., Cao Y., et al. Spatio-temporal knowledge embedding method considering the lifecycle of geographical entities // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024. Vol. 131. P. 13. DOI:10.1016/j.jag.2024.103967.
10. Howson C. *The logic of bayesian probability* // *Foundations of Bayesianism* / ed. by D. Corfield, J. Williamson. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2001. P. 137–159.
11. Пичугин М.К., Гурвич И.А., Баранюк А.В. и др. Разработка диагностического алгоритма идентификации замерзающих осадков на Дальнем Востоке на основе данных реанализа ERA5 и измерений со спутника GPM //

Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 282.  
DOI:10.21046/22DZZconf-2024a.

**АВТОРЫ** **Бельшева Юлия Владимировна**

✉ meteoinfo@list.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра информационно-измерительных систем,  
факультет геоинформатики и информационной безопасности

🆔 0009-0002-5785-3904

**Гвоздев Олег Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра информационно-измерительных систем,  
факультет геоинформатики и информационной безопасности

канд. техн. наук

🆔 0000-0002-1917-3206

**Матерухин Андрей Викторович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»  
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра информационно-измерительных систем,  
факультет геоинформатики и информационной безопасности

д-р техн. наук

🆔 0000-0002-9576-9925

Поступила 13.01.2025. Принята к публикации 22.08.2025. Опубликовано 29.08.2025.



# The concept of spatio-temporal phenomena

**Yulia V. Belysheva<sup>1</sup>, Oleg G. Gvozdev<sup>1</sup>✉, Andrey V. Materukhin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
✉ gvozdev@miigaik.ru

**CITATION** Belysheva YuV, Gvozdev OG, Materukhin AV. The concept of spatio-temporal phenomena. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(4): 70–82. DOI:10.30533/GiA-2025-023.

**KEYWORDS** spatio-temporal data, data processing, complex phenomena, space-time

**ABSTRACT** In many practical problems, solved via spatio-temporal properties of studied phenomena, precisely measured values of basic indicators, facts or spatial relations are not as significant as integral characteristics, that are often can't be strictly defined. In subject areas for which such problems are typical, has developed practice of their integral representation as binary, point, categorical and continuous scales. In this paper, a formal apparatus of spatio-temporal phenomena is proposed. It allows to take into account aspects related to the limited applicability of base subject area concepts, aspects of spatiotemporal uncertainty of studied phenomena, and fundamentally non-strict definition of practically significant concepts. A human-machine-readable notation based on the grammar of the Python 3 is proposed. It allows to define spatio-temporal phenomena and, potentially, capable of serving as a base for their identification and localization automation. Several examples of its application for definition of meteorological phenomena is given. The proposed constructions allow to unify of data processing of the localization of complex phenomena in space and time, including circumstances different subject areas interaction.

**ACKNOWLEDGEMENTS** The results were obtained within the framework of the state assignment No. FSFE-2022-0002 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

- REFERENCES**
1. Dovey K, Woodcock I, Pike L. Isochrone Mapping of Urban Transport: Car-dependency, Mode-choice and Design Research. *Planning Practice & Research*. 2017;32(4): 402–416. DOI:10.1080/02697459.2017.1329487.
  2. Reis JP, Silva EA, Pinho P. Spatial metrics to study urban patterns in growing and shrinking cities. *Urban Geography*. 2016;37(2): 246–271. DOI:10.1080/02723638.2015.1096118.

3. DeRubertis D. Recent Trends in Four Common Stability Indices Derived from U.S. Radiosonde Observations. *Journal of Climate*. 2006;19(3): 309–323. DOI:10.1175/JCLI3626.1.
4. Kotjak PA, Chebykina EV, Voronin AN, et al. Izmenenie toksichnosti pochvy pod dejstviem tehnologij vozdeleyvaniya kultur [Changes in soil toxicity under the influence of cultivation technologies]. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2023;8(226): 25–33. (In Russian). DOI:10.53083/1996-4277-2023-226-8-25-33.
5. Kowalska JB, Mazurek R, Gašiorek M, et al. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination – A review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40: 2395–2420. DOI:10.1007/s10653-018-0106-z.
6. Zhang H, Casey T. Verification of Categorical Probability Forecasts. *Weather and Forecasting*. 2000;15(1): 80–89. DOI:10.1175/1520-0434(2000)015<0080:VOCPF>2.0.CO;2.
7. Koyuncu M. Intelligent fuzzy queries for multimedia databases. *International Journal of Intelligent Systems*. 2011;26(10): 930–951. DOI:10.1002/int.20507.
8. Moreira J, Duarte J, Dias P. Modeling and Representing Real-World Spatio-Temporal Data in Databases. *Proceedings of the 14th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2019), September 9–13, 2019, Regensburg*. Saarbrücken/Wadern: Dagstuhl Publishing, 2019. P. 1–14. DOI:10.4230/LIPIcs.COSIT.2019.6.
9. Zhao X, Zhang J, Cao Y, et al. Spatio-temporal knowledge embedding method considering the lifecycle of geographical entities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2024;131: 13. DOI:10.1016/j.jag.2024.103967.
10. Howson C. The logic of bayesian probability. *Foundations of Bayesianism*. Corfield D, Williamson J (ed.). Dordrecht: Springer Science + Business Media; 2001: 137–159.
11. Pichugin MK, Gurvich IA, Baranjuk AV, et al. Razrabotka diagnosticheskogo algoritma identifikatsii zamerzajuschih osadkov na Dalnem Vostoke na osnove dannyh reanaliza ERA5 i izmerenij so sputnika GPM [Development of a diagnostic algorithm for identification of freezing precipitation in the Far East based on ERA5 reanalysis data and GPM satellite measurements]. *Proceedings of the 23rd International Conference “Modern problems of remote sensing of the Earth from space”*. Moscow: IKI RAS, 2024: 268. DOI:10.21046/22DZZconf-2024a.

**AUTHORS Yulia V. Belysheva**

✉ meteoinfo@list.ru

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Information and Measurement Systems, Faculty of Geoinformatics and Information Security

 0009-0002-5785-3904
**Oleg G. Gvozdev**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Information and Measurement Systems, Faculty of Geoinformatics and Information Security  
 PhD in Engineering

 0000-0002-1917-3206
**Andrey V. Materukhin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia  
 Department of Information and Measurement Systems, Faculty of Geoinformatics and Information Security  
 Dr. of Sci. (Engineering)

 0000-0002-9576-9925

Submitted: January 13, 2025. Accepted: August 22, 2025. Published: August 29, 2025.