

УДК 910.1:51-7

**ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПАНДЕМИИ КОРОНАВИРУСА COVID-19**

**Черкашин Александр Константинович**

д.г.н., профессор,

зав. лабораторией теоретической географии, e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Лесных Светлана Ивановна**

к.г.н., с.н.с., e-mail: [lsvetll@mail.ru](mailto:lsvetll@mail.ru)

**Красноштанова Наталья Евгеньевна**

к.г.н., н.с., e-mail: [kne1988@rambler.ru](mailto:kne1988@rambler.ru)

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

**Аннотация.** Информационно-математическая технология сбора и первичной обработки пространственных данных организуется в форме геоинформационного мониторинга (ГИМ) по метатеоретическим принципам строения пространственно-распределенных коммутационных полей – расчлененных функционально связанных пространств конструктивной деятельности. Это соответствует правилам информационного и математического обеспечения САПР создания пространственно-графических форм и тематических карт разного содержания. Вокруг распределенных БД разных ГИС образуется слой информационных взаимодействий различных проектов и пользователей. Отдельные БД соответствуют порталам – узлам связи пользовательской ГИС с глобальным информационным многообразием. ГИМ-технология реализуется на примере оперативного формирования специальной БД ГИС и построения статистических графиков развития пандемии нового коронавируса COVID-19 на национальном уровне. Процессы и графики моделируются в терминах теории надежности с описанием кривых функциями плотности вероятности распределения экстремальных событий, из которых оптимальной является функция Фреше распределения моментов времени выявления заболеваний у населения. Использование относительных показателей надежности минимизирует влияние ошибок данных, а их межстрановой анализ указывает на наличие постоянных коэффициентов уравнений, что позволяет применять эпидемиологическую модель в дальнейших исследованиях статистических рядов.

**Ключевые слова:** геоинформационный мониторинг, COVID-19, пандемия нового коронавируса, математическое моделирование, национальные особенности.

**Цитирование:** Черкашин А. К., Лесных С.И., Красноштанова Н.Е. Геоинформационный мониторинг и математическое моделирование развития пандемии коронавируса COVID-19 // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 17-35. DOI:10.38028/ESI.2021.21.1.002

**Введение.** Формирование и развитие пандемии нового коронавируса COVID–19 (SARS-CoV–2), помимо биомедицинских и организационных проблем поставили новые масштабные задачи создания, совершенствования и использования математических и информационных технологий в плане сбора, преобразования, представления и использования пространственных данных для статистического анализа, прогнозирования и управления критическими ситуациями. Осуществляется оперативный мониторинг изменения во времени количества установленных случаев заражения, числа выздоровевших и умерших с построением многочисленных эпидемических кривых и ГИС-картографированием накопленной информации на глобальном, государственном, региональном и местном уровнях с учетом демографической структуры большого населения, факторов и условий развития эпидемии коронавируса по различным странам.

Научная дисциплина, названная академиком Н.Н. Яненко математической технологией (МТ), представлена тремя системами: автоматизированного проектирования инженерных конструкций, решением больших задач математического моделирования и работой специализированных ЭВМ параллельного действия [1]. Наличие такой технологической последова-

тельности позволило по-новому решать проблему моделирования. Объектом МТ является вычислительная часть этой последовательности: математическая модель → численный алгоритм → программа → расчеты на ЭВМ [2]. Особое внимание уделяется конечным стадиям цепочки, связанным с параллельными вычислениями. Вместе с тем, существенными (невычислительными) проблемами моделирования являются аналитические задачи первых этапов технологии: разработка идей и методов математического моделирования, решение которых вносит ясность в процесс создания моделей разного вида. Это инновационный, метатеоретический уровень реализации МТ [3, 4], что позволяет решать сложные задачи проектирования и конструирования математических моделей. Метатеоретический подход реализуется на границе знаний математики и содержательных теорий и соответствует особому стилю конкретного мышления [5].

Для аппроксимации эмпирических кривых и поверхностей функциями различной сложности применяются методы, используемые в системах автоматизированного проектирования изделий – САПР [6, 7]. Она реализуется средствами параметрического моделирования с использованием параметров объектов и соотношений между ними, что дает возможность варьировать параметры и их связи, быстро создавать новые конфигурации. Параметр – это независимая исходная величина, используемая для выделения геометрического объекта из множества других по внутренним свойствам, внешним факторам и пространственно-временному положению, а также характеристика связи параметров – коэффициентов моделей. Вариационная параметризация основана на построении модели пространственного объекта в виде системы уравнений связи параметров [6].

Обычно проектирование эпидемических кривых идет по простой иерархической схеме путем введения в модель SIR [8, 9] новых переменных и дифференциальных уравнений. В статье предлагается подход к моделированию эпидемий с позиций теории надежности. Он основан на естественной взаимосвязи понятий надежности и используется для аппроксимации временных рядов данных и картографического отображения внутренних параметров эпидемического процесса распространения коронавируса среди населения разных стран и регионов с проверкой адекватности различных моделей по материалам оперативного геоинформационного мониторинга, поступающих из различных источников.

**1. Геоинформационный мониторинг.** Основная функция геоинформационного мониторинга (ГИМ) – формирование геоинформационного объекта (ГИО), наполнение баз данных геоинформационных систем (БД ГИС) по модели данных «территориальный объект-свойство». В этом качестве мониторинг выступает как посредник между реальностью и информационными структурами, куда включены не только средства массовой информации, но и результаты научного анализа и визуализации сведений, в частности, ГИС-картографирования ситуации. Виды мониторинга различаются по целевой установке – направлению предоставления и использования информации о ситуации. ГИМ в структуре территориального управления – это деятельность, ориентированная на наполнение и актуализацию инвариантных баз данных и знаний ГИС, привлекаемых для решения самых разных задач математическими средствами моделирования [10]. Мысленное и фактическое разделение функций ГИМ и ГИС дает возможность лучше формулировать и решать свойственные им проблемы. ГИС в широком смысле выступает в качестве части информационного блока организационной системы территориального управления, а ГИМ решает задачи связи наблюдаемой реальности с блоком ГИС, причем прослеживаются инструментальные и технологические различия двух систем.

Смысл и содержание ГИМ хорошо передается термином «статистическое исследование», которое состоит из этапов: 1) проведение мероприятий по подготовке исследования; 2)

сбор первичных данных (статистическое наблюдение – СН); 3) сводка, т. е. систематизация и группировка статистических данных; 4) первичный анализ, обобщение полученных данных, обнаружение простых закономерностей и их отображение в форме аналитических отчетов, таблиц, графиков, карт, инфограмм, научных статей. Выделяют три формы СН: 1) отчетность, когда сведения постоянно поступают в статистические органы от отдельных предприятий и учреждений в виде информации об их деятельности по установленным формам; 2) специально организованное СН, которое проводится с конкретной целью и на определенную дату для получения дополнительной информации; 3) регистровые наблюдения (регистры) – форма непрерывного СН за долговременными процессами, имеющими начало, стадию развития и конец с использованием регистрационных карточек и формуляров на соответствующих носителях [11].

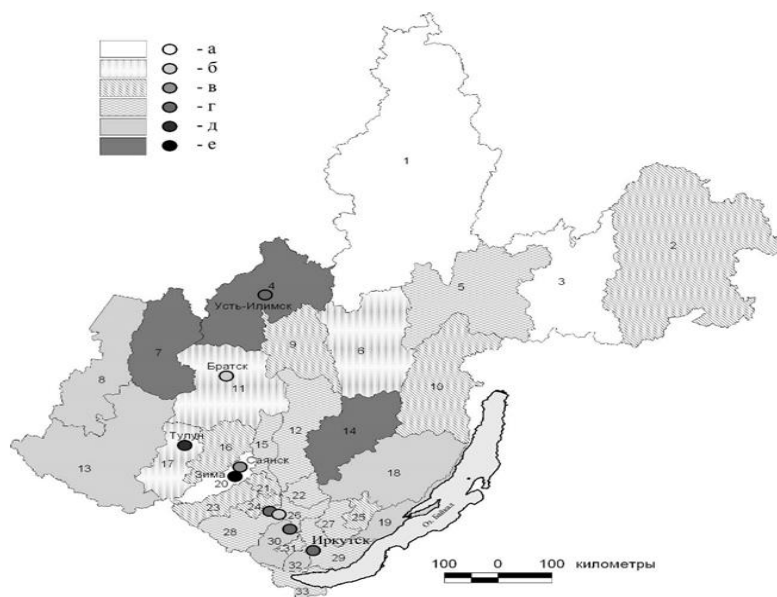
В процедуре формирования БД ГИС первым важнейшим этапом является инвентаризация первичной информации из различных мест, что можно рассматривать в качестве своеобразного постоянно действующего ГИМ за старыми и новыми источниками пространственных данных. В соответствии с требованием полноты сконцентрированной в ГИС информации ГИМ должен предоставлять данные, позволяющие удовлетворять различные запросы. При появлении задач, требующих качественно новой информации, эта информация собирается и добавляется в БД и используется наравне со старыми сведениями. Следующие этапы ГИС – первичная обработка, картографическое и инфографическое представление накопленной информации и геоинформационное математическое моделирование. Здесь используются известные методы ГИС-анализа: SQL-запросы, наложение контуров или алгебра карт. Результаты их применения зависят от достоверности, собранной ГИМ информации, а также совершенства моделей и методов ее преобразования.

ГИМ является многоуровневым процессом, в котором учитывается естественная территориальная иерархия. Формируются постоянные и переменные составляющие БД ГИС фонового, текущего и оперативного мониторинга. Постоянной, инвариантной основой являются сетки контуров, представленные административными, ландшафтными, лесоустроительными, кадастровыми и растровыми границами членения территории. Каждая ячейка сетки (район, ареал, выдел, пиксел) связаны со значениями атрибутов базы данных ГИС, которые сохраняются, пополняются, обновляются, преобразуются и отображаются на картах. Эта информация становится основой для интерпретации результатов ГИМ.

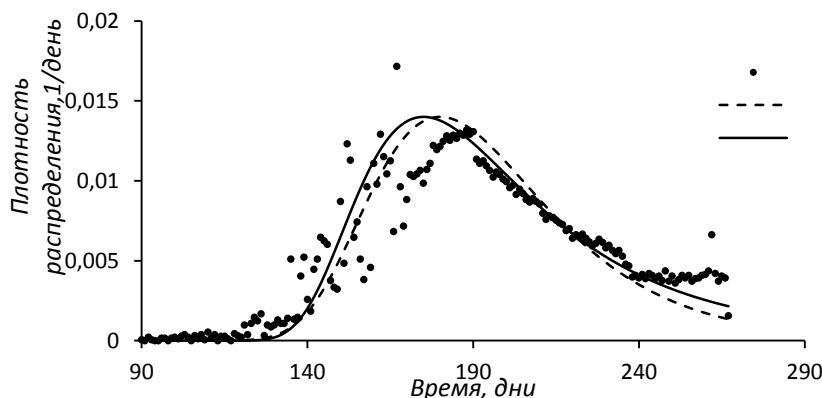
Новая пандемическая ситуация, связанная с распространением коронавируса COVID-19 в мире, потребовала организации и проведения оперативного ГИМ и использования ГИС-технологии с представлением пространственной информации средствами инфографики – социально значимой формы графического и коммуникационного дизайна. Например, географическая инфографика показывает число случаев заболевания, летальных исходов и выздоровлений для более чем 3000 округов США [12]. В каждой стране и на уровне ее регионов созданы информационные порталы, где в онлайн режиме отражается изменение ситуации с распространением инфекции [13, 14, 15], в частности, картографически показано количество выявленных заражений по муниципальным районам [16]. В Южной Корее мониторинговая технология геопозиционирования прослеживает и информирует население о перемещении инфицированных людей и возможных контактах с инфекцией [17], что также реализовано в России [18].

Средствами ГИМ формируется ГИО в виде БД ГИС, для чего осуществляется сбор информации из различных источников и ее подготовка к системному анализу и картографированию. При необходимости проводятся дополнительные наблюдения, опросы и измерения для пополнения БД сведениями о факторах и условиях, ограничениях и обременениях дея-

тельности. Первичные, аналитические карты содержат исходную информацию описания ситуации. На основе БД строятся статистические графики – условные изображения числовых величин и их соотношений в виде различных геометрических образов — символов, точек, линий, плоских фигур: чертежей, рисунков, картосхем и картограмм. Такие образы придают наглядность исходным данным, визуально представляют закономерности средствами систем статистического анализа (SPSS, Statgraph, Statistica, SAS и т.д.) и в системах обработки электронных таблиц вида MS Excel.



**Рис. 1.** Картограмма пространственной изменчивости интенсивности среднесуточного прироста (%) числа установленных случаев заболевания коронавирусом COVID-19 по муниципальным районам и городам Иркутской области на пике эпидемии (начало июля, 2020 г.). Градации прироста: *a* – 0%; *б* – 0 - 20%; *в* - 20 - 50%; *г* - 50 - 100%; *д* - 100 - 200%; *е* - 200 - 380%. Муниципальные районы: 1 – Катанский; 2 – Бодайбинский; 3 – Мамско-Чуйский, 4 – Усть-Илимский, 5 – Киренский, 6 – Усть-Кутский, 7 – Чунский, 8 – Тайшетский, 9 – Нижнеилимский, 10 – Казачинско-Ленский, 11 – Братский, 12 – Усть-Удинский, 13 – Нижнеудинский, 14 – Жигаловский, 15 – Балаганский, 16 – Куйтунский, 17 – Тулунский, 18 – Качугский, 19 – Ольхонский, 20 – Зиминский, 21 – Нукутский, 22 – Осинский, 23 – Заларинский, 24 – Аларский, 25 – Баяндаевский, 26 – Боханский, 27 – Эхирит-Булагатский, 28 – Черемховский, 29 – Иркутский, 30 – Усольский, 31 – Ангарский, 32 – Шелеховский, 33 – Слюдянский.

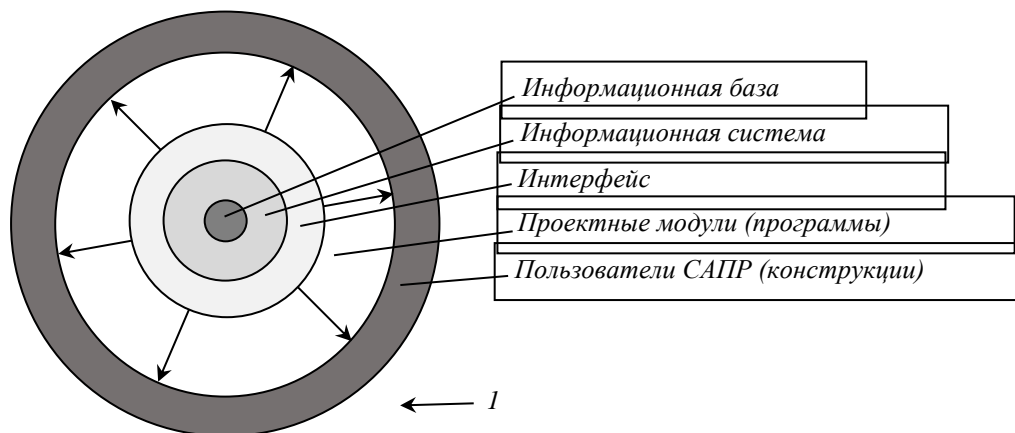


**Рис. 2.** Статистический график временной изменчивость суточного прироста числа установленных случаев заболевания коронавирусом COVID-19 в Иркутской области (1) и графический образ соответствующей закономерности – функции плотности распределения предельных значений по формуле Гумбеля (2) и Фреше (3).

Аппроксимация графических образов по схеме САПР методами параметризации подразумевает преобразование информации БД ГИС, что рассматривается в качестве косвенных измерений и подразумевает использование средств квалиметрии, расчет соответствующих метрик пространства признаков и применение математических моделей и методов. Вычисляются вторичные данные, связь которых отражает более глубокие закономерности пространственной (рис. 1) и временной (рис. 2) изменчивости параметров состояния территорий.

**2. Методология САПР.** ГИМ выполняет функции геоинформационного обеспечения подготовки проектных решений и создания математических, графических и картографических моделей. САПР – это процесс основанного на системном подходе и математическом моделировании описания и создания в заданных условиях новых объектов или алгоритмов их функционирования на базе первичного изучения этих объектов и алгоритмов с применением компьютеров. Это достигается объединением современных технических средств и математического обеспечения, параметры которых выбираются с учетом особенностей задач проектно-конструкторской деятельности специалистов – пользователей системы. Подсистемы САПР определенного этапа проектирования делятся на объектные (объектно-ориентированные) и инвариантные (объектно-независимые), выполняющие соответственно специальные и унифицированные проектные процедуры и операции. При проектировании и составлении карт объектно-ориентированный подход связан с задачами методического, информационного и математического обеспечения, а инвариантный – с техническим, программным, системным и прикладным обеспечением процессов изготовления географических карт средствами ГИС. ГИС интегрируют свойства САПР, автоматизированных систем управления и картографирования, совместимых с промышленными системами типа ArcInfo, MapInfo, AutoCAD и др. [19].

Множество исходных данных и запоминаемых результатов работы по методологии САПР образуют БД ГИС, взаимосвязанную с проектными модулями через специально организуемый интерфейс, который защищает их от влияния специфики программной реализации ГИС, что обеспечивает независимость проектных операций от вида представления информации в базе данных (рис.3). Вокруг БД ГИС формируется единый слой информационных взаимодействий разных проектов и пользователей. В САПР послойная дифференциация (декомпозиция) конструкции изделий, решения задач и массива информации является основой методологии.



**Рис. 3.** Послойная схема информационного обеспечения САПР [21, с изменениями]:

1 – направления (векторы) проектирования (модели, программы).

Примеры типовых маршрутов (технологии) проектирования: разрезание принципиальной схемы устройства на части, размещение микросхем на плате, расслоение их межсо-

единений, расчленение сложной задачи синтеза документации на простые задачи промежуточных проектных решений (блочный-иерархический подход к организации проектирования) [20]. В этом смысле математической моделью процесса проектирования могут стать мета-теоретические процедуры расслоения дискретных множеств и непрерывных пространств [3].

**3. Процедуры расслоения.** Расслоением  $s = (X, \pi, B)$  называется отображение  $\pi$  множества  $X$  на множество  $B$ :  $\pi : X \rightarrow B$ , где  $X$  - множество (пространство, объект) расслоения,  $B = \{b_j\}$  - база расслоения, состоящая из набора элементов  $b_j$  этой базы. Обратное отображение (сечение)  $\sigma = \pi^{-1}$  ( $\sigma : B \rightarrow X$ ) превращает  $X$  в расслоенное множество  $Y = \{Y_j\}$ . Для любого элемента  $b_j \in B$  прообраз  $Y_j = \sigma(b_j)$  называется слоем расслоения  $\pi$  над элементом  $b_j \in B$ . В частном случае расслоение - это сортировка (разбиение) множества элементов  $X$  на непересекающиеся подмножества  $Y = \{Y_j\}$  элементов, что происходит, например, при классификации элементов по типам  $b_j \in B$ . В БД ГИС и соответствующих геоизображениях выделяется несколько картографических слоев, различающихся по тематике  $b_j \in B$ . Карта территории дифференцируется по контурам административных районов или ландшафтных выделов, где тип каждого контура представлен в картографической легенде  $B$  отдельным знаком  $b_j$ . Послойная организация пространственно привязанных данных является одной из характерных особенностей ГИС. Такой подход используется при проектировании и создании цифровых карт, обработке результатов дистанционного зондирования земли, при выполнении кадастровых работ.

Аналитической формой анализа данных становится касательное расслоение многомерного пространства  $X = \mathbb{R}^n$  координат  $x = \{x_i\}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) над многообразием  $M \subset X$ :  $\pi : X \rightarrow M$ ,  $\pi^{-1} : M \rightarrow MT = \{MT_{x_0}\}$ . Каждый базовый элемент (точка касания)  $b \in M$  слоя  $MT_{x_0}$  координируется набором значений  $x_0 = \{x_{0i}\}$ . Многообразие - это поверхность в пространстве расслоения  $X$ , заданная непрерывной функцией  $F(x)$ , или  $F(x_0)$ . В этом смысле многообразие - это огибающая множества независимых слоев  $MT_{x_0} \subset X$ , увязывающая эти слои по форме  $F(x)$ . При проектировании исходят из содержательной гипотезы, что все существующие многообразия локально линейны, т.е. их свойства  $F(x)$  в окрестности каждой точки  $x_0$  однозначно соответствуют свойствам  $f(y)$  касательного слоя  $MT_{x_0}$  в точке  $x_0 \in F(x) \subset X$ . Функция  $f(y) = F(x) - F_0$ ,  $F_0 = F(x_0)$  задается в смещенных локальных координатах  $y = x - x_0$  билинейным уравнением дифференциальной геометрии [22]

$$f(y) = Lf = \sum_{i=1}^n a_i y_i, a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i} = \frac{\partial F}{\partial x_i}, L = \sum_i \frac{\partial}{\partial y_i} y_i, \quad (1)$$

С каждым элементом  $b$  связана локальная система координат  $y = \{y_i\}$  с началом  $x_0 = \{x_{0i}\}$  в координатном пространстве  $x = \{x_i\}$  (радиус-вектор), набор функций  $F(x)$  и  $f(y)$ , ковекторы их чувствительности  $a = \{a_j\}$  к изменению  $y = \{y_i\}$  или  $x = \{x_j\}$  и векторный оператор  $L$  для этих функций. На практике  $x_0$  рассматривается как номинальное (инвариантное) значение состояния системы, от которого отсчитываются отклонения  $y$  с допуском  $y_0 \geq y$ . В конкретных приложениях эти понятия интерпретируются специальным образом.

Операторные уравнения  $f(y) = Lf$  (1) связи переменных  $y = \{y_i\}$  не различаются по слоям и в этом смысле свойства слоев эквивалентны для разных функций  $F(x) = f(y) + F(x_0)$ , различающихся только видом функций  $F$  и значениями этих функций  $F(x_0)$  в точке касания  $x_0$ . Координаты  $x_0 = \{x_{0i}\}$  характеризуют условия среды реализации соответствующих универсальных связей  $f(y)$  типового слоя  $MT \leftrightarrow MT_x$ , сравнимого с любым слоем  $MT_{x_0}$ . В геоинформационных системах они соответствуют порталам - узлам связи пользовательской ГИС с глобальным информационным многообразием.

**4. Логика применения.** При конструировании [20] с помощью математических моделей  $F(x)$  сначала определяются геометрические и топологические свойства объектов. В

функциональном проектировании моделируются последовательные изменения состояния объектов функциями взаимосвязи  $F(x)$  фазовых переменных  $x=\{x_j\}$ , что характеризуют состояние объекта, и внешних показателей  $x_0=\{x_{0i}\}$ , параметризующих состояния их среды, а также независимых переменных времени  $t$  и пространственных координат  $\xi$ . Решением системы уравнений являются зависимости  $F[x(t, \xi)]$ , представленные в табличной форме и в виде графиков пространственно-временных и факторных взаимосвязей и карт. Верификация на основе моделирования заключается в установлении соответствия проектного решения  $F[x(t, \xi)]$  исходному, эталонному описанию ТЗ или модели  $F(x)$  типового слоя  $MT_0$ . Причем  $F[x(t, \xi)]$  и  $F(x)$  могут иметь разный состав фазовых переменных, но в локальных координатах  $y=x-x_0$  приводиться к одинаковым, в пределах заданной точности, типовым зависимостям  $f(y)$ . Соответствие моделей с разными параметрами среды  $x_0$  различных касательных слоев  $MT_{x_0}$  называется функциональной эквивалентностью, позволяющей действовать по прецеденту – переносить наработки одного проекта в другой.

При структурной (качественной) и параметрической (количественной) верификации необходимо отсеивать нерациональные варианты решений, выбирать лучшие модели  $F(x)$  и по данным статистически определять их коэффициенты согласно ситуации. Модели находятся в классе отношений  $F(x) = f(y)+F(x_0)$ , где  $f(y)$  определяет специальную метрику локального пространства слоя  $MT_{x_0}$  (расстояния точки  $x$  от  $x_0$ ), или в виде конкретной функции  $G[f(y)]$  от  $f(y)$  [23]. Анализ чувствительности модели состояния и изменения объекта в слое  $f(y)$  (1) осуществляется по коэффициентам чувствительности  $a_i$ . Вектор коэффициентов  $a=\{a_i\}$  определяет значение и направление изменений, по всему многообразию  $M$  послойно формирует каноническое эйлерово поле  $Lf(y)=f(y)$ , моделирующее объект  $F(x)$  в каждой точке  $x_0$  в виде функциональных схем  $F(x_0)$  – сети однородных узлов  $x_0 \in MT_{x_0}$  и ячеек  $MT_{x_0}$  (см. рис.3) функционально связанного расслоенного пространства  $MT=\{MT_{x_0}\}$ . Информационные комплексы (устройства) математического обеспечения слоев  $MT_{x_0} \leftrightarrow MT_0$  формируются по универсальной схеме обеспечения типового слоя  $MT_0$ , что позволяет применять типовые модели при проектировании широкой номенклатуры объектов. Этот принцип стандартизации (комплексности) является теоретическим фундаментом автоматизации проектирования [20]. Функциональная эквивалентность слоев позволяет сделать в технологии ГИМ любой разработанный слой типовым (централизованным). Преобразование (морфизм, отображение, передача информации, сигнала)  $\phi_{x_0}: MT_0 \rightarrow MT_{x_0}$  рассматривается как трансформация, когда базовые структуры и функции слоя  $MT_0$  преобразуются в новые формы, например, при трансляции программ или загрузке информации в БД ГИС. Формально при этом меняется содержание узлов связи  $x_0$ , т.е. положение слоя  $MT_{x_0}$  на многообразии  $M$ , относительно которого по-новому интерпретируется информация. Преобразование в несколько этапов  $MT_{x_i} \rightarrow MT_{x_{i+1}}$  называется трассировкой – пошаговым выполнением трансформации с остановками на каждом этапе (слое).

В итоге, всякая проектируемая система может быть представлена моделью расслоения многообразия – локально линейного образования, по частям (слоям) представимая в форме расслоенного векторного пространства и формирующего функционально связанный комплекс (гомологию и гомотопию) со свойствами трассировки по пути (треке, тракте), заданном на многообразии. Наглядной иллюстрацией расслоенного многообразия могут быть различные коммутационные поля (КП), что решают задачи соединения двух или нескольких узлов источников нагрузки между собой в коммутационные сети. Формы КП могут различаться, обеспечивая материальные, энергетические, информационные, механические, электрические, транспортные и иные соединения частей целого. Например, шестеренчатая коробка передач, соединяющая двигатель с другими механизмами машины, или квартира из нескольких

смежных соединенных дверьми (коммутационными элементами – КЭ) комнат и вспомогательных помещений с различающимися хозяйственно-бытовыми функциями (режимами работы) с отдельным наружным входом-выходом. При смене местоположения (слоя) изменяется режим функционирования находящихся в их среде объектов. КЭ обеспечивает контакт слоев путем их замыкания-размыкания, изменения проводимости КП по соответствующему регламенту (типу трансформации режима, протоколу обмена). Каналы передачи информации (стыки, сигналы обмена, интерфейсы) устанавливаются между двумя элементами (точками) КП, в частности, абонентами (пользователями, клиентами), терминалами, портами, компьютерами, сервисами, программами, БД. Связи (коммутации) определяются в соответствии с проектной конструкцией системы или по заявке (вызову, запросу) в динамическом режиме под управлением терминального модуля (многообразия связи).

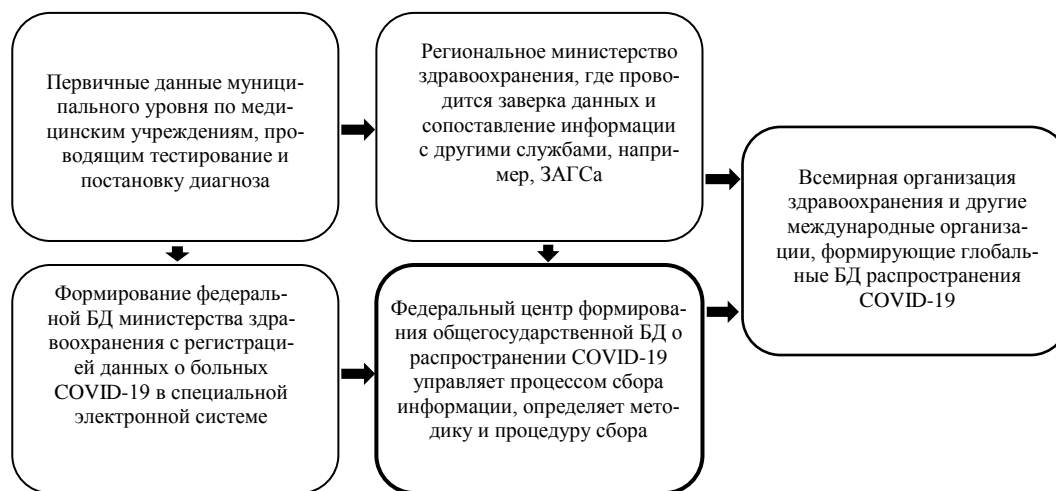
Примеры многообразий КП информационного обмена: интегральные микросхемы, многопроцессорные системы, телефонные абонентские сети, однородные вычислительные системы, распределенные базы данных. В них есть общая информационная среда интеграции (многообразие сети) и связанные с ней универсальные узлы и ячейки (слои) обеспечения коммутации, сбора, хранения и распределенной обработки информации. Первичное появление нескольких однородных узлов подразумевает в перспективе конструирование огибающего многообразия их разветвленной сети. Информация выходит из многообразия связи в конкретный слой, где реализуются соответствующие операции, результаты которых передаются в другие слои, работающие автономно (независимо). Иллюстрацией является развитие распределенных и параллельных СУБД системы, где данные распределены между компьютерами сети или узлами многопроцессорной структуры, и расширение БД обеспечивается добавлением в сеть дополнительных машин. Так, CALS-технологии служат средством интеграции промышленных автоматизированных систем в единую многофункциональную, комплексную систему с созданием общего информационного пространства для всех участников проектирования и производства [24].

Распределённая БД – это единая БД, связанные части которой размещаются в различных узлах компьютерной сети КП, например, опубликованы в Интернете. Доступ к ней обеспечивается высокоуровневым интерфейсом. БД имеет разный уровень реплицированности – от полного отсутствия дублирования, до полного дублирования всей информации во всех распределённых копиях. Многообразие геоинформационной среды формируется средствами ГИМ из различных источников местного, регионального и глобального уровней. Узлы КП представлены персональными БД в Интернете на различных носителях и в разных формах для решения специальных задач (см. рис. 3). Персональные терминалы пользователей объединены многообразием КП через территориальные серверы. Специальной операцией ГИМ является извлечение информации из геоинформационной сети, ее централизация под ГИС-проект. Распределение, включая послойную фрагментацию и репликацию, независимых данных по множеству узлов сети незаметно для пользователей (прозрачно). Прозрачность доступа означает, что пользователи имеют дело с единым (изоморфным) логическим образом базы данных и осуществляют доступ к распределенным данным в режиме ГИМ так, как если бы они хранились централизованно на одном устройстве (геопортале).

**5. ГИМ пандемического процесса.** В глобальном масштабе местами ГИМ централизованного сбора и хранения информации о COVID-19 являются интернет-сайты, наиболее известные из которых – веб-сайты ВОЗ [25], Университета Джонса Хопкинса [12] и Worldmeters.info [26], где в режиме реального времени непрерывно идет процесс формирования баз данных по странам. Источником первичной информации являются тысячи официальных ресурсов о текущей ситуации по коронавирусу: правительств, министерств здравоохранения, региональных организаций, которые сопоставляются и верифицируются. Таким



образом, качество и количество информации статистических наблюдений за случаями заражения, выздоровления, летальности и т.д. зависит от множества условий и факторов, характеризующих ситуацию в каждой стране, в частности, от принятых здесь стандартов отчетности. Например, в одних странах количество заразившихся представлено числом только лабораторно выявленных случаев, а в других, – с учетом клинической картины заболеваний. Отмечается, что разрыв между фактической заболеваемостью и зарегистрированными случаями зависит от количества выполненных тестов на коронавирус и прозрачности отчетности страны [26]. Существуют экспертные оценки [26], показывающие, что количество невыявленных случаев кратно количеству выявленных, поэтому для статистического сравнения лучше пользоваться относительными показателями.



**Рис. 4.** Схема ГИМ формирования базы данных по распространению новой коронавирусной инфекции.

В России сбор информации о распространении новой коронавирусной инфекции осуществляется через Министерство здравоохранения. Официальная статистическая информация по стране и отдельным регионам о количестве регистрируемых случаев заболевания, выздоровевших и умерших людей ежедневно публикуется на сайте Коммуникационного центра Правительства Российской Федерации [27]. Региональные министерства здравоохранения формируют ежедневную статистику по муниципалитетам и региону в целом, а затем данные передают в федеральную БД. В федеральной и региональных БД есть некоторые различия в данных. Во-первых, ряд регионов опаздывают с подачей сведений, когда информация входит в федеральную БД только на следующий день. Во-вторых, нередко расходятся числа регистрируемых случаев: чаще расхождения отмечаются по выздоровевшим и умершим пациентам. При выборочном анализе имеющейся статистики по 13-ти регионам такие расхождения фиксировались в 39 % случаев. Тема сбоя и несоответствий в сборе статистических данных по коронавирусу неоднократно поднималась в российских СМИ.

На региональном уровне статистическая информация поступает ежедневно от органов управления муниципалитетами, куда данные передаются из медицинских учреждений (рис.4). Поскольку ВОЗ даёт только рекомендации по мониторингу распространения коронавируса, на государственном уровне системы сбора и обработки данных могут варьироваться, поэтому прямое без предварительной обработки межстрановое сопоставление исходных данных затруднительно. Для формирования международных БД могут также использоваться региональные данные, если создание национальной БД идет с опозданием или дает ограниченную информацию. При проведении ГИМ для исследования закономерностей распространения новой коронавирусной инфекции в границах разных стран желательно привлекать БД

государств, применяющих при формировании статистики сходные методики учета заболевших, выздоровевших и умерших в результате заражения COVID-19.

**6. Математическое обеспечение моделирования.** Руководствуясь положениями метатеоретического анализа, ставится задача найти адекватную модель развития эпидемии коронавируса COVID-19 по разным странам, т.е. провести структурную и параметрическую верификацию разных моделей и выбрать лучшую из них. Обычно здесь для моделирования используются классическая и обобщенная эпидемиологические модели SIR У. Кермака и А.МакКендрика 1927 г. [8, 9]. Она описывает перераспределение числа восприимчивых ( $S$ ), инфицированных ( $I$ ), умерших ( $D$ ) и по-разному удаленных ( $R$ ) из эпидемического процесса частей населения, например, количество выздоровевших пациентов. Рост числа вновь заболевших (инфицированных) описывается дифференциальным уравнением логистической модели

$$\frac{dS}{dt} = -AIS, \quad \frac{dI}{dt} = AIS = AI(S_0 - I), \quad (2)$$

где  $S_0$  и  $S(t)$  – исходное, базовое в группах риска и текущее количество не переболевшего населения, восприимчивого к инфекции (тыс. чел.);  $I(t)=S_0-S(t)$  – число обнаруженных, подтвержденных случаев заболевания людей-источников инфекции с начала процесса  $t=t_0$ ;  $A$  – положительная константа (частота контактов в расчете на тыс. чел. в день). Эти коэффициенты – управляемые величины, зависящие от поведения людей и эффективности национального здравоохранения. К сожалению, логистическая кривая функции решения уравнения (2) плохо соответствует статистическим графикам развития пандемии нового коронавируса по странам, и необходимо искать новые проектные решения.

Одним из перспективных направлений моделирования является оценка опасности и риска [28; 29], что формализуется в терминах теории вероятности и надежности [30, 31]. Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, обеспечивающих выполнение определенных функции в данных условиях [32, 33]. Надёжность связывается с отсутствием отказов (утрат, потерь, жертв, аварий) в работе (деятельности) – свойством объекта сохранять его работоспособность (жизнедеятельность) во времени или в процессе наработки по принятому параметру (возрасту, расстоянию, числу применений). Отказ в эпидемическом процессе связан со случаями инфицирования, потерей здоровья или смертью человека. Надежность характеризует ситуацию в относительных показателях без учета числа объектов в системе, в их ожидаемом осредненном поведении.

Развитие эпидемии отражается в показателях надежности, например, убывающей функцией надежности  $P^*(t)$  – вероятности безотказной работы организма, сохранения здоровья к моменту  $t$  (для COVID-19 в днях с начала пандемии, 31 декабря 2019 г.). Функция кумулятивной вероятности накопления отказов (ненадежности) равна  $F^*(t)=1-P^*(t)$ , так что в эпидемиологической модели (2):  $S(t)=S_0P^*(t)$ ,  $I(t)=S_0F^*(t)$ . На основе функции надежности  $P^*(t)$  рассчитываются другие показатели:

$$\begin{aligned} P(t) &= -\frac{dP^*(t)}{dt}, \\ E(t) &= -\ln P^*(t), \quad E^*(t) = -\ln F^*(t), \\ p(t) &= \frac{dE}{dt} = \frac{P(t)}{P^*(t)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P(t)$  – функция плотности вероятности (распределения) отказов, в частности, доля количества подтвержденных случаев инфицирования за единицу времени (сутки);  $E(t)$  – интегри-

рованная опасность, вероятность того, что процесс будет продолжаться до момента  $t$ ;  $p(t)$  – интенсивность отказов, дифференцированная опасность, или риск, равный доле заболевших за единицу времени в численности чувствительного населения  $S(t)$  (заболеваемость).

Для описания эпидемического процесса  $F^*(t)$  используется дважды экспоненциальная функция распределения Гомпертца – Гумбеля [30, 31], которая является частным случаем распределения Фишера–Типпета–Гнеденко экстремальных событий [34]. Выделяются три типа распределений экстремальных – наибольших или наименьших – значений в большой выборке: функции вероятности Гумбеля, Фреше и Вейбула. Эти и другие функции составляют основу математического обеспечения аппроксимации статистической зависимости доли инфицированного  $F^*(t)$  и неинфицированного  $P^*(t)$  чувствительного населения территории от времени  $t$  наступления событий (момента обнаружения заболеваний). Из числа этих функций обоснованно по заданным критериям выбирается оптимальный закон распределения для отображения статистических графиков. Проектирование ориентировано на поиск естественного закона истинного распределения, согласующегося по статистическим критериям с имеющимися данными для отдельной страны не только для кумулятивной кривой инфицирования  $F^*(t)$ , но, что важнее, с показателями плотности распределения  $P(t)$ , интенсивности  $p(t)$  и интегрированной опасности  $E(t)$  заражения (отказа).

Для наибольших и наименьших значений функция распределения закона Гумбеля соответственно имеет вид:

$$F^*(z) = \exp[-\exp(-z)], \quad (4)$$

$$F^*(z) = 1 - \exp[-\exp(z)], \quad P^*(z) = \exp[-\exp(z)], \quad (5)$$

где  $z = \alpha x + \beta = \alpha(x - x_0) \sim \alpha(t - t_m)$ ,  $x_0$ ,  $t_m$  – коэффициенты локальности (локализации) и  $\lambda = 1/\alpha$  – масштаба (размерности). В данном случае переход от (4) к (5) связан с заменой независимой переменной  $z \rightarrow -z$ , или  $x \leftrightarrow x_0$ . Функции плотности распределения для вариантов (4) и (5) имеют вид (рис. 5):

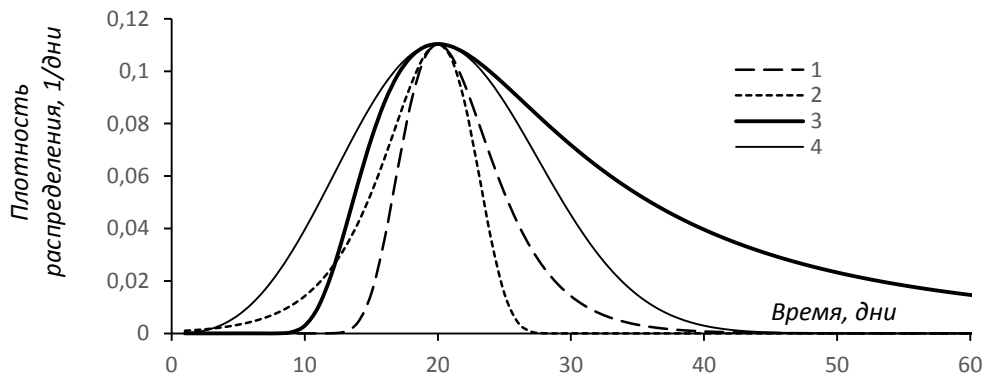
$$P(z) = \exp(-z)\exp[-\exp(-z)], \quad P(z) = \exp(z)\exp[-\exp(z)]. \quad (6)$$

В обоих случаях максимум  $P_m$  функции  $P(z)$  наблюдается при  $z=0$  и равен  $P_m=1/e$ . При  $z = \alpha(x - x_0)$  максимум  $P_m(x, x_0) = \alpha \exp(-1)$  имеет место при  $x = x_0$ , что позволяет наглядно по положению экстремума ( $x_0$ ,  $P_m$ ) статистического графика  $P(x, x_0)$  приближенно определять коэффициент  $\alpha = eP_m$ . Аналогично для  $z = \alpha(t - t_m)$  находится  $\alpha = eP_m = eP(t_m)$ .

Распределения Фреше  $F^*(z) = \exp(-z^{-\alpha})$ ,  $z > 0$ ,  $\alpha > 0$  и Вейбула  $F^*(z) = \exp(-(-z)^{-\alpha})$ ,  $z \leq 0$  или  $z > 0$ ,  $\alpha > 0$  при замене переменных  $z^{-\alpha} = \pm \exp[-\alpha(\tau - t_m)]$  приводятся к уравнениям вида (4)–(5) в новых переменных собственного времени  $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m$  ( $1/\theta$  – константа растяжения графиков):

$$F^*(z) = \exp(-z^{-\alpha}) = \exp\{-\exp[-\alpha(\tau - t_m)]\}. \quad (7)$$

Значение коэффициента  $\alpha$  находится аналогично по положению  $\tau = t_m = \theta \ln(t_m/t_m) + t_m = t_m$ ,  $z = \pm 1$  максимума  $P_m$  функции плотности распределения  $\alpha = eP_m$ ,  $\tau(t_m) = t_m$ .



**Рис. 5.** Разные виды кривых плотности распределения соответственно максимальных и минимальных значений по: 1-2 – функциям Гумбеля, 3-4 – функциям Фреше с одинаковыми параметрами  $\alpha=0,3/\text{день}$ ,  $\tau_m=20$  дней,  $\theta=9$  дней.

Уравнения вероятности  $F^*(z)$  появления экстремальных значений  $z$  разных типов имеют общий вид (7) для максимальных и минимальных величин  $\tau=t$  и  $\tau=\theta \ln(t/t_m)+t_m$ , что обеспечивается заменой  $-z \leftrightarrow z$  в функциях распределения. Это удвоение дает для работы дополнительное семейство распределений  $P^*(z)$  с  $\alpha < 0$  (см. формулы (4) и (5)). Для (7) интегрированная опасность  $E^*(\tau) = -\ln F^*(z) = \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]$  и риск (интенсивность отказа)  $p(\tau) = -E^*(\tau)/d\tau = \alpha \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)]$ , где  $p(\tau_m) = p_m = \alpha$  – приемлемый риск. Величина  $K(\tau) = \ln[-E^*(\tau)] = -\alpha(\tau - \tau_m)$  линейно зависит от  $\tau$ , что раньше использовалось для построения статистического графика зависимости  $F^*(z)$  от  $\tau$  на специальной вероятностной бумаге для определения типа частотного распределения данных. Зависимость  $K(\tau) = -\alpha(\tau - \tau_m)$  является функциональным аналогом универсального уравнения (1) при  $f(y) = K(\tau)$ ,  $y = \tau - \tau_m$ , т.е. значение  $\tau = \tau_m$  соответствует точке касания линией  $K(\tau)$  огибающего многообразия  $F(\tau)$ . Касательная  $K(\tau, \tau_m)$  к  $F(\tau)$  в новой точке  $\tau = \tau_m$  – это слой, в котором формируется распределение  $F^*(z) = \exp\{-\exp[K(\tau, \tau_m)]\}$  с индивидуальными параметрами  $(\tau_m, \alpha)$ . При изменении  $\tau_m$  конструируется путь (трассировка) на  $F(\tau)$ , вдоль которого меняются  $K(\tau, \tau_m)$  и происходит переход от одной функции  $F^*(z)$  к другой.

Величина  $p_m = dK(\tau, \tau_m)/d\tau = \alpha$  – приемлемый риск  $p(\tau_m)$ , поэтому  $K(\tau, \tau_m)$  имеет смысл интегрированной опасности по постоянному значению  $p(\tau_m)$ . Константа  $\alpha$  – чувствительность изменения  $K(\tau, \tau_m)$  при изменении  $\tau$ , что определяет значение и направление вектора  $\alpha$  индивидуально в каждом слое  $K(\tau, \tau_m)$  (см. рис.3). Содержательно  $p_m = \alpha = eP_m = eV_m/S_0$  определяется величиной экстремума (пика) функции плотности распределения, увеличивается с ростом максимума текущего прироста заболеваемости  $V_m$  и снижается с увеличением потенциала заражения  $S_0$ , меняющегося по странам и континентам. Величины  $(\tau_m, \alpha)$  варьируют от места к месту, сохраняя общий (истинный) вид функциональной зависимости  $P(\tau, \tau_m)$  с параметрами  $(\tau_m, \alpha)$ .

Появление уравнений вида (7) связано с описанием механизма саморегулирования распространения инфекции в показателях интегрированной опасности:

$$dE^*(\tau)/d\tau = -\alpha \exp[-\alpha(\tau - \tau_m)] = -\alpha E^*(\tau), p(\tau) = \alpha E^*(\tau), \quad (8)$$

т.е. величины дифференциальной  $p(\tau)$  и интегрированной  $E^*(\tau)$  опасности пропорциональны с коэффициентом приемлемого риска  $p_m = \alpha$ . Устойчивое уменьшение  $E^*(\tau)$  с ходом времени  $\tau$  регулируется текущей опасностью инфицирования  $E^*(\tau)$ . Уравнение (8) связано с логистическим уравнением (2)

$$dE^*(\tau)/d\tau = -\alpha E^*(\tau), d \ln F^*(\tau)/d\tau = -\alpha \ln F^*(\tau), dF^*(\tau)/d\tau = \alpha F^*(\tau) P^*(\tau) \quad (9)$$

при  $E^*(\tau) = -\ln F^*(\tau) \approx 1 - F^*(\tau) = P^*(\tau)$  и  $F^*(\tau) = I(\tau)/S_0$ ,  $P^*(\tau) = S(\tau)/S_0$ ;  $A = \alpha/S_0 = eV_m/S_0^2$  – частота контактов. Кроме того, выражение (8) является вариантом универсального уравнения (1), представленного в виде

$$f(y) \leftrightarrow p(\tau) - p_m = \alpha[E^*(\tau) - E^*(\tau_m)]. \quad (10)$$

Статистические графики суточного прироста числа установленных случаев инфицирования коронавирусом COVID-19 вначале быстро растут, выходят на плато и затем медленно снижаются (см. рис. 2). Из кривых рассмотренных функций (рис. 4) этим особенностям качественно удовлетворяют функции распределений Гумбеля и Фреше (7) максимальных величин. Последняя удобна тем, что путем варьирования  $\theta$  при расчете переменных собственного времени  $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m$  удается увеличивать размеры плато кривой процесса развития эпидемии. При сравнении статистических и теоретических кривых (см. рис. 2 и 3) предпочтение отдается функции Фреше как более общей и адекватной по критериям сходства, а также по причине того, что в окрестности пика эпидемии  $t = t_m$  величина  $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m \approx \theta[t/t_m - 1] + t_m = \theta(t - t_m)/t_m + t_m = (\theta/t_m)(t - t_m) + t_m$  линейно зависит от времени и при  $\theta = t_m$  полностью совпадает с ходом времени  $\tau = t$ , а функция Фреше с распределением Гумбеля. Отношение  $\eta = \theta/t_m$  указывает на степень соответствия рассматриваемой ситуации этому идеальному случаю.

В электронных таблицах MS Excel по алгоритму описания статистического графика суточного прироста числа инфицированного COVID-19 населения в России 2020 г. выделяется момент начала  $t_0 = 67$  день 2020 г., когда  $S(t_0) \geq 10$  установленных случаев заражения, и конца  $t_k = 240$  день первой (весенней) волны эпидемии (локальный минимум на графике  $S(t)$ ). Величина  $S(t_k) = S_0 = 975576$  чел. считается потенциалом заражения. Рассчитывается показатель ненадежности – вероятность потери здоровья чувствительным населением  $S_0$ :  $F^*(t) = S(t)/S_0$ . Вычисляется плотность распределения моментов заражения – доля суточного прироста заболевших  $P(t) = F^*(t+1) - F^*(t)$  и другие показатели надежности (2): интегрированная опасность  $E^*(t) = -\ln F^*(t)$ , риск  $p(t) = E^*(t+1) - E^*(t)$ . По графику  $P(t)$  приблизительно определяется мода распределения – момент пика эпидемии  $t_m = 149$  дней и максимальное значение  $P_m = P(t_m) = 0,0097$ /день и приемлемый риск  $\alpha = eP_m = 0,0264$ /день. Рассчитывается ход собственного времени  $\tau = \theta \ln(t/t_m) + t_m$  при  $\theta = t_m$ . По формуле (7) вычисляются аппроксимирующие кривые распределений  $P(t)$  и  $P(\tau)$  по времени  $t$  и  $\tau$  с варьированием параметров  $t_m$ ,  $P_m$  и  $\theta$  для обеспечения сходства по коэффициенту корреляции  $R$ . Функция Фреше распределения предельных значений при  $\eta = \theta/t_m = 130/149 = 0,87$  дает лучшее приближение ( $R = 0,95$ ) данных, чем функция Гумбеля ( $R = 0,89$ ).

При проектировании, геоинформационном обеспечении методами ГИМ и создании карт перечисленных базовых параметров формируется таблица коэффициентов уравнения Фреше распределения установленных случаев заболевания (табл. 1). Для ее заполнения данные по росту числа заболевших и приблизительные параметры плотности распределения по странам подставляются в таблицу MS Excel и автоматически рассчитываются коэффициенты модели и кривые аппроксимации. Значения  $\alpha = eP_m$  одинаковы по разным странам Европы. Это означает, что пандемия по странам относится к одному типу явлений, и существует линия  $P(t_m) = P_m = 0,0947$ /день, огибающая сверху территориальные функции  $P(t)$ . Кривые функций  $P(t)$  различаются сроками  $t_m$  наступления пика  $P(t) = P(t_m) = P_m$  эпидемии. Заболеваемость по странам (слоям, прецедентам) формирует своеобразное КП распространения инфекции со сдвижкой по времени. Увеличение значения  $\theta$  относительных темпов хода собственного времени  $\tau$  приводит к сокращению длительности эпидемического периода  $\Delta t_0 = t_0 - t_k$  в стране, что также индивидуализирует процесс, а с другой стороны, приводит зависимости  $P(t)$  к одной типовой модели с постоянными коэффициентами.

**Таблица 1.** Сравнение параметров функции плотности распределения Фреше для статистических графиков числа установленных случаев заболевания коронавирусом COVID- 9 1 за сутки по европейским странам (первая волна пандемии 2020 г.)

Страна	Значения параметров функции								
	$S_0$	$t_0$	$t_m$	$t_k$	$P_m$	$\alpha$	$\theta$	$R$	$\eta$
Россия	975,576	67	149	240	0,0097	0,026	130	0,96	0,87
Великобритания	285,279	39	101	183	0,0095	0,026	198	0,97	1,96
Италия	243,230	52	84	195	0,0095	0,026	226	0,98	2,69
Германия	187,226	55	89	164	0,0095	0,026	431	0,94	4,84
Беларусь	69,516	64	130	229	0,0095	0,026	200	0,97	1,54
Бельгия	62,058	63	97	188	0,0095	0,026	270	0,91	2,78
Нидерланды	50,834	62	100	187	0,0095	0,026	220	0,86	2,20
Польша	35,950	68	127	187	0,0095	0,026	61	0,79	0,48
Швеция	33,188	59	114	144	0,0095	0,026	106	0,84	0,93
Швейцария	30,871	59	85	153	0,0095	0,026	348	0,94	4,09
Украина	20,986	77	119	144	0,0095	0,026	205	0,94	1,72
Румыния	19,398	67	103	153	0,0095	0,026	200	0,86	1,94
Молдова	19,382	74	173	194	0,0095	0,026	261	0,75	1,51
Австрия	16,731	61	85	152	0,0095	0,026	530	0,95	6,24
Дания	13,032	63	94	185	0,0095	0,026	350	0,86	3,72
Сербия	11,412	71	105	152	0,0095	0,026	370	0,90	3,52
Чехия	9,196	65	88	150	0,0095	0,026	386	0,86	4,39
Норвегия	8,977	60	84	193	0,0095	0,026	270	0,88	3,21
Финляндия	7,294	65	99	194	0,0095	0,026	159	0,80	1,61
Венгрия	4,086	71	105	172	0,0095	0,026	275	0,77	2,62
Люксембург	4,019	72	83	153	0,0095	0,026	470	0,88	5,66
Хорватия	2,252	64	88	166	0,0095	0,026	329	0,92	3,74
Эстония	2,034	66	89	208	0,0095	0,026	270	0,73	3,03
Литва	1,803	75	90	175	0,0095	0,026	360	0,67	4,00
Словакия	1,528	71	97	159	0,0095	0,026	107	0,58	1,10
Словения	1,486	68	86	161	0,0095	0,026	210	0,83	2,44
Латвия	1,122	71	87	185	0,0095	0,026	310	0,77	3,56

**Заключение.** Проведенное исследование позволяет на частных примерах продемонстрировать информационно-математическую технологию сбора и обработки геоинформации и метатеоретические свойства строения пространственно-распределенных коммутационных полей. Математическая модель всякой распределенной системы является многообразием, т.е. локально линейной и по частям представимой формой расслоенного пространства, где каждый слой касается многообразия в одной точке – портале, через который происходит обмен информацией и организации геоинформационного мониторинга (ГИМ) для централизации данных под конкретную задачу исследования и проектирования. Возможны разные формы представления расслоения в дискретном (структурном) и непрерывном (аналитическом) виде, что создает основу математического обеспечения САРП и реализации информационно-математических технологий проектирования и создания пространственно-графических форм и тематических карт разного содержания, отражающих базовые параметрические свойства систем. Технология ГИМ должна допускать возможность постоянного наращивания объема хранящейся и обрабатываемой информации и ее дублирования по прецедентам использования под разнообразные задачи моделирования, проектирования и прогнозирования.

На основе ГИМ-порталов создается множество геоинформационных объектов (ГИО) – инвариантной основы ГИС-картографирования. По этапам расслоения и преобразования информации ГИО (геоинформационный образ) – это сам пространственный объект изучения

и проектирования, его геоинформационный образ в коммутационном поле, распределенная и сосредоточенная базы данных ГИС, результаты преобразования и отображения информации БД, итоговый графический и картографический продукт интегрального содержания, формы его прикладного использования по направлениям. Здесь основная задача – добиться соответствия разных ГИО на всех этапах трансформации данных и обеспечить многовекторное использование накопленной БД под решение конкретных задач с применением различных системно-теоретических интерпретаций (моделей).

Информационная технология выявления закономерностей развития пандемии нового коронавируса состоит из ГИМ сбора (централизации, сосредоточения) пространственной информации и системного анализа статистических графиков изменения эпидемических показателей с целью выбора адекватной модели процесса по критериям сходства с исходными данными и метатеоретическими процедурами расслоения. Процессы и графики интерпретируются в терминах теории надежности с описанием кривых функциями вероятности распределения экстремальных событий, из которых по качественным и количественным показателям сходства оптимальной является функция Фреше распределения максимальных значений. Подготовлена таблица коэффициентов этой модели первой (весенней) волны развития пандемического процесса 2020 г. по странам с выявлением национальной специфики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б. Математическое моделирование и информационные технологии в Сибирском отделении РАН. Традиции и современность // Вычислительные технологии. 2007. № 3(12). С. 8-23.
2. Яненко Н.Н. Проблемы вычислительной механики // Очерки, статьи, воспоминания. Новосибирск: Наука. 1988. С.72-102.
3. Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019а. № 2(14). С. 69-87.
4. Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019б. № 1(13). С. 61-84.
5. Черкашин А.К. Геокартографическое мышление в современной науке // Геодезия и картография. 2020б. №7. С. 27-36.
6. Малюх В.Н. Введение в современные САПР. М.: ДМК Пресс. 2010. 192 с.
7. Полозов В.С., Будеков О.А., Ротков С.И., Широкова Л.В. Автоматизированное проектирование. Геометрические и графические задачи. М.: Машиностроение. 1983. 280 с.
8. Бейли Н. Математика в биологии и медицине. М.: Мир, 1970. 326 с.
9. Kermack W., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics – part III. Further studies of the problem of endemicity // Bulletin of Mathematical Biology. 1991. №3 (1-2). Pp. 89-118.
10. Черкашин А.К., Лесных С.И., Склянова И.П. Координационное управление природоохранной деятельностью региона: концептуальная модель // Теоретическая и прикладная экономика. 2019. № 3. С.81–97.
11. Полякова В.В., Шаброва Н.В. Основы теории статистики. 2-е изд. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2015. 148 с.
12. COVID-19 Dashboard by Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University. Режим доступа: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (дата обращения 15.11.2020)

13. Карта распространения коронавируса в России и мире. Режим доступа: <https://yandex.ru/maps/covid19> (дата обращения 29.05.2020).
14. Онлайн карта распространения коронавируса. Режим доступа: <https://coronavirus-monitor.ru/> (дата обращения 29.05.2020).
15. Ситуация с заболеваемостью коронавирусом в РБ: официальный геопортал Республики Бурятия. Режим доступа: <http://geo.govrb.ru/covid.html> (дата обращения 29.05.2020).
16. Эпидемиологическая обстановка в Иркутской области: официальный портал. Режим доступа: <https://irkobl.ru/coronavirus/> (дата обращения 29.05.2020).
17. Как выздоровела Южная Корея // Газета Коммерсант. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4314331> (дата обращения 29.05.2020).
18. Минкомсвязь оповестила регионы о создании системы отслеживания больных коронавирусом и их контактов по геолокации. Режим доступа: <https://d-russia.ru/minkomsvjaz-opovestila-regiony-o-sozdanii-sistemy-otslezhivaniya-bolnyh-koronavirusom-i-ih-kontaktov-pogeolokacii.html> (дата обращения 29.05.2020).
19. Ананьев Ю.С. Геоинформационные системы. Томск: Изд-во ТПУ. 2003. 70 с.
20. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР. М.: Высшая школа. 1990. 335 с.
21. Информационное обеспечение систем автоматического проектирования. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/4296928/page:4/> (дата обращения 28.08.2020).
22. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука. 1971. 240 с.
23. Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Методика создания оценочных карт опасности кризисных ситуаций на основе картографической информации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 75-88.
24. Шалумов А.С., Никишкин С.И., Носков В.Н. Введение в CALS-технологии. Ковров: КГТА. 2002. 137 с.
25. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. Режим доступа: <https://covid19.who.int/> (дата обращения 15.11.2020).
26. Worldmeter. International statistic website. Режим доступа: <https://worldmeters.info> (дата обращения 15.11.2020).
27. Официальная информация о коронавирусе в России. Режим доступа: <http://стопкоронавирус.рф> (дата обращения 15.11.2020).
28. Черкашин А. К. Оценка качества жизни на основе решения обратной задачи моделирования динамики численности населения // Народонаселение. № 1. 2014. С. 54–67.
29. Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Моделирование оценки риска хозяйственной деятельности в районах нового нефтегазового освоения // Проблемы анализа риска. 2015. № 6. С. 21-29.
30. Черкашин А.К. Иерархическое моделирование эпидемической опасности распространения нового коронавируса COVID-19 // Проблемы анализа риска. 2020а. №4(17). С. 10-21.
31. Черкашин А. К. Национальные особенности изменения опасности развития пандемии коронавируса COVID-19: математическое моделирование и статистический анализ // Народонаселение. 2020в. № 3(23). С. 83-95.
32. Северцев Н.А., Дедков В.К. Методологические вопросы надежности и безопасности // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2007. № 3(6). С. 123-128.
33. Nøyland A., Rausand M. System Reliability Theory: Models and Statistical Methods. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.. 2004. 518 p.
34. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир. 1965. 451 с.



UDK 910.1:51-7

**GEOINFORMATION MONITORING AND MATHEMATICAL MODELING OF THE  
COVID-19 PANDEMIC DEVELOPMENT**

**Aleksander K. Cherkashin**

Dr., Professor,

Head of the Laboratory "Theoretical geography", e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Svetlana I. Lesnykh**

Dr., senior scientific researcher, e-mail: [llsvetll@mail.ru](mailto:llsvetll@mail.ru)

**Natalia E. Krasnoshtanova**

Dr., scientific researcher, e-mail: [kne1988@rambler.ru](mailto:kne1988@rambler.ru)

V.B. Sochava Institute of Geography

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

664033, Irkutsk, Russia, Ulan-Batorskaya st. 1.

**Abstract.** Information and mathematical technology for collecting and primary processing of spatial data is organized in the form of geoinformation monitoring (GIM) according to metatheoretical principles of the structure of spatially distributed commutation fields – stratified (bundle) functionally connected spaces of constructive activity. This corresponds to the rules of information and mathematical support of CAD for creating spatial-graphic forms and thematic maps with different content. A layer of information interactions between different projects and users is formed around database of different distributed GIS. Individual database correspond to portals as nodes of communication of the user's GIS with the global information diversity. The GIM technology is implemented on the example of the operational formation of a special GIS database and the construction of statistical graphs of the development of the novel coronavirus (COVID-19) pandemic at the national level. Processes and graphs are modeled in terms of reliability theory with the description of curves by probability density functions of the distribution of extreme events, of which the Frechet function of the time moments distribution for coronavirus disease detected cases in the population is optimal. The use of relative reliability indicators minimizes the impact of data errors, and their cross-country analysis indicates the presence of constant coefficients of the equations, which makes it possible to apply the epidemiological model in further studies of statistical data.

**Key words:** geoinformation monitoring, novel coronavirus pandemic, COVID-19, mathematical modeling, national characteristics

REFERENCES

1. Shokin YU.I., Chubarov L.B. Matematicheskoe modelirovanie i informacionnye tekhnologii v Sibirskom otdelenii RAN. Tradicii i sovremennost' [Mathematical modeling and information technology in the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Tradition and modernity] // Vychislitel'nye tekhnologii = Computing technology. 2007. № 3(12). Pp. 8-23. (in Russian).
2. Yanenko N.N. Problemy vychislitel'noj mekhaniki [Problems of computational mechanics] // Ocherki, stat'i, vospominaniya = Essays, articles, memoirs. Novosibirsk. Nauka = Science. 1988. Pp.72-102. (in Russian).
3. Cherkashin A.K. Innovacionnaya matematika: poisk osnovanij i ogranichenij modelirovaniya real'nosti [Innovative Mathematics: A Search of the Bases and Limits of Modeling Reality] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019a. № 2(14). Pp. 69-87. (in Russian).
4. Cherkashin A.K. Metateoreticheskoe sistemnoe modelirovanie prirodnyh i social'nyh processov i yavlenij v neodnorodnoj srede [Metatheoretical System Modelling of Natural and Social Processes and Phenomena in Heterogenous Environment] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019b. № 1(13). Pp. 61-84. (in Russian).

5. Cherkashin A.K., Geokartograficheskoe myshlenie v sovremennoj nauke [Geocartographic thinking in modern science] // Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography. 2020. №7. Pp. 27-36. (in Russian).
6. Maljuh V.N. Vvedenie v sovremennye SAPR [Introduction to modern CAD systems]. Moscow. DMK Press = DMK Press. 2010. 192 p. (in Russian).
7. Polozov V.S., Budekov O.A., Rotkov S.I., SHirokova L.V. Avtomatizirovannoe proektirovanie. Geometricheskie i graficheskie zadachi [Computer-aided design. Geometric and graphic tasks]. Moscow. Mashinostroenie = Mechanical engineering. 1983. 280 p. (in Russian).
8. Bejli N. Matematika v biologii i medicine [Mathematics in biology and medicine]. Moscow. Mir = World. 1970. 326 p. (in Russian).
9. Kermack W., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics – part III. Further studies of the problem of endemicity // Bulletin of Mathematical Biology. 1991. vol. 5. № 3(1-2). Pp. 89-118.
10. Cherkashin A.K., Lesnykh S.I., Sklyanova I.P. Koordinacionnoe upravlenie prirodoohrannoju dejatel'nost'ju regiona: konceptual'naja model' [Coordination management of the region's environmental activities: a conceptual model] // Teoreticheskaja i prikladnaja jekonomika = Theoretical and Applied Economics. 2019. № 3. Pp.81–97. (in Russian).
11. Polyakova V.V., SHabrova N.V. Osnovy teorii statistiki. 2-e izd. [Foundations of the theory of statistics. 2nd ed.]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta = Ural un-ty Publishing House. 2015. 148 p. (in Russian).
12. COVID-19 Dashboard by Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University. Available at: <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (accessed 15.11.2020).
13. Karta rasprostraneniya koronavirusa v Rossii i mire [Map of the spread of coronavirus in Russia and the world]. Available at: <https://yandex.ru/maps/covid19> (accessed 29.05.2020). (in Russian).
14. Onlajn karta rasprostraneniya koronavirusa [Online map of the spread of coronavirus]. Available at: <https://coronavirus-monitor.ru/> (accessed 29.05.2020). (in Russian).
15. Situaciya s zbolevaemost'ju koronavirusom v RB: oficial'nyj geoportal Respubliki Buryatiya [The situation with the incidence of coronavirus in the RB: the official geoportal of the Republic of Buryatia]. Available at: <http://geo.govrb.ru/covid.html> (accessed 29.05.2020).
16. Epidemiologicheskaya obstanovka v Irkutskoj oblasti: oficial'nyj portal [Epidemiological situation in the Irkutsk region: official portal]. Available at: <https://irkobl.ru/coronavirus/> (accessed 15.11.2020). (in Russian).
17. Kak vyzdorovela Yuzhnaya Koreya. Gazeta Kommersant [How South Korea recovered. Kommersant newspaper]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4314331> (accessed 29.05.2020) (in Russian).
18. Minkomsvyaz' opovedila regiony o sozdanii sistemy otslezhivaniya bol'nyh koronavirusom i ih kontaktov po geolokacii [The Ministry of communications notified the regions about the creation of a system for tracking coronavirus patients and their contacts by geolocation] // <https://d-russia.ru/minkomsvjaz-opovedila-regiony-o-sozdanii-sistemy-otslezhivaniya-bolnyh-koronavirusom-i-ih-kontaktov-po-geolokacii.html> (in Russian).
19. Anan'ev Yu.S. Geoinformacionnye sistemy [Geoinformation systems]. Tomsk. Izd-vo TPU=TPU Publishing House. 2003. 70 p. (in Russian).
20. Norenkov I.P., Manichev V.B. Osnovy teorii i proektirovaniya SAPR [Fundamentals of the theory and design of CAD]. Moscow. Vysshaya shkola = Higher school. 1990. 335 p. (in Russian).

21. Informacionnoe obespechenie sistem avtomaticheskogo proektirovaniya [Information support for automated design systems]. Available at: <https://studfile.net/preview/4296928/page:4/> (accessed 28.08.2020). (in Russian).
22. Arnol'd V.I. Obyknovennye differencial'nye uravneniya [Ordinary differential equations]. Moscow. Nauka = Science. 1971. 240 p. (in Russian).
23. Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Metodika sozdaniya ochenochnyh kart opasnosti krizisnyh situacij na osnove kartograficheskoy informacii [Methodology for Creating Assessment Maps of the Crisis Situations Hazard on the Basis of Cartographic Information] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 4 (16). Pp. 75-88. (in Russian).
24. Shalumov A.S., Nikishkin S.I., Noskov V.N. Vvedenie v CALS-tekhnologii [Introduction to CALS technologies]. Kovrov. KGTA =KGTA. 2002. 137 p. (in Russian).
25. WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. Available at: <https://covid19.who.int/> (accessed 15.11.2020).
26. Worldmeter. International statistic website. Available at: <https://worldmeters.info> (accessed 15.11.2020).
27. Oficial'naya informaciya o koronavirusе v Rossii [Official information about the coronavirus in Russia]. Available at: <http://стопкоронавирус.рф> (accessed 15.11.2020). (in Russian).
28. Cherkashin A.K. Ocenka kachestva zhizni na osnove resheniya obratnoj zadachi modelirovaniya dinamiki chislennosti naseleniya [The quality of life assessment based on solving the inverse problem of modeling population dynamics] // Narodonaselenie = Population. 2014. № 1. Pp. 54–67. (in Russian).
29. Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Modelirovanie ocenki riska hozyajstvennoj deyatel'nosti v rajonah novogo neftegazovogo osvoeniya [Risk assessment modeling of economic activities in areas of new oil and gas development] // Problemy analiza riska = Problems of risk analysis. 2015. № 6. Pp. 21-29. (in Russian).
30. Cherkashin A.K. Ierarhicheskoe modelirovanie epidemicheskoy opasnosti rasprostraneniya novogo koronavirusa COVID-19 [Hierarchical modeling of the epidemic hazard of the spread of the new coronavirus COVID-19] // Problemy analiza riska = Problems of risk analysis. 2020a. № 4 (17). Pp. 10-21. (in Russian).
31. Cherkashin A.K. Nacional'nye osobennosti izmeneniya opasnosti razvitiya pandemii koronavirusa COVID-19: matematicheskoe modelirovanie i statisticheskij analiz [National characteristics of changes in the hazard of development of the COVID-19 coronavirus pandemic: mathematical modeling and statistical analysis] // Narodonaselenie = Population. 2020b. № 3(23). Pp. 83-95.
32. Severcev N.A., Dedkov V.K. Metodologicheskie voprosy nadezhnosti i bezopasnosti [Methodological issues of reliability and safety] // Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika = Bulletin of TvSU. Series: Applied Mathematics. 2007. № 3(6). Pp. 123-128. (in Russian).
33. Høyland A., Rausand M. System Reliability Theory: Models and Statistical Methods. New Jersey: John Wiley& Sons Inc., 2004. 518 p.
34. Gumbel' E. Statistika ekstremal'nyh znachenij [Statistics of extreme values]. Moscow. Mir = Universe. 1965. 451 p. (in Russian).