

**А.К. ЧЕРКАШИН\*, И.Ю. ЛОБЫЧЕВА\*\***

\*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, akcherk@irmok.net

\*\*Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, Россия, terh@yandex.ru

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗЕМЛЕВЕДЕНИЯ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

*Географическое пространство рассматривается как двойственная система подпространства геофизических координат и подпространства координат компонентных признаков состояния геосистем. Разрабатываются теоретическая и математическая модели взаимодействия этих подпространств в терминах векторных полей, волновых уравнений и функций, уравнений эйконала и локальных пучков линейных зависимостей метеорологических показателей. По положениям центров пучков восстанавливается климатическая зональная норма в виде точек глобального многообразия связи показателей. В этой модели реализуется принцип геометризации географического знания — хронологический подход к обоснованию варьирования локальных закономерностей взаимодействия природных характеристик в географической среде. Прослежена логическая и статистическая взаимосвязь географических явлений планетарного и местного уровней. При расчетах использовались среднесуточные значения скалярных полей абсолютной температуры и удельной влажности воздуха на изобарической поверхности АТ-700 гПа за разные месяцы 2014 г. по логарифмически преобразованным данным NCEP/NCAR Reanalysis. Выделены широтные средовые инварианты температуры и влажности воздуха и представлена карта, отражающая зональную и азональную неоднородность географической среды. Этим определяется основная тематика землеведения — выявление проекции космических и глобальных циклов на локальные системообразующие закономерности, что необходимо для развития теории, моделей и методов научного анализа корреляции скалярных полей географических характеристик и пространственных процессов, их обуславливающих.*

Ключевые слова: теория землеведения, глобальные данные, поля географических показателей, глобальные и локальные подпространства, модели взаимодействия векторных полей, волновые уравнения и функции, уравнение эйконала.

**A.K. CHERKASHIN\*, I.Yu. LOBYCHEVA\*\***

\*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, akcherk@irmok.net

\*\*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 126A, Russia, terh@yandex.ru

## EARTH SCIENCE THEORETICAL MODELS FOR QUANTITATIVE ANALYSIS OF GLOBAL SPATIAL DATA

*Geographical space is considered as a dual system of subspace of geophysical coordinates and subspace of component coordinates of the geosystems states. The theoretical and mathematical models of the interaction of these subspaces in terms of vector fields, wave equations and functions, eikonal equations and local sheaves of linear dependencies of meteorological parameters are developed. The climatic zonal norms are reconstructed in the form of points of the global manifold of indicators links according to the positions of the sheaf centers. This model implements the principle of geometrization of geographical knowledge as the horological approach to justifying the local regularities of the interaction of natural characteristics in the geographical environment. The logical and statistical interrelation of the geographical phenomena of planetary and local levels is studied. Calculations used the average daily values of the scalar fields of atmospheric absolute temperature and specific humidity on the isobaric AT-700 hPa surface for different months of 2014 according to logarithmically converted NCEP/NCAR Reanalysis Data. Latitudinal environmental invariants of air temperature and humidity are identified, and a map reflecting the zonal and azonal heterogeneity of the geographical environment is presented. This determines the main theme of earth science as the identification of the projection of space and global cycles onto the local system-forming patterns, which is necessary for the development of the theory, models and methods of scientific analysis of the correlation of scalar fields of geographical characteristics and spatial processes that cause them.*

Keywords: theory of earth science, global data, fields of geographical indicators, global and local subspaces, models of interaction of vector fields, wave equations and functions, eikonal equation.

## ВВЕДЕНИЕ

Теоретическим базисом географической науки выступает землеведение — наиболее общая отрасль географии [1], изучающая закономерности строения, формирования и развития географической оболочки Земли. Землеведение — фундаментальная основа, как географических наук, так и процесса университетского освоения географических знаний [2], формирования географического мировоззрения. В изложении общего землеведения наблюдаются как минимум три разных подхода: описательно-картографический, физический и комплексный. Первый представлен еще трудами К. Риттера и А. Геттнера и их последователей [3]. Они принимают в качестве первичной идею хорологии, определяющую предмет географии как процесс заполнения пространства взаимосвязанными субстанциями разного качества. Пространственный анализ в геоинформатике — один из основных при обработке геоданных для выявления территориальных особенностей размещения и связей объектов в решении задач геоинформационного моделирования [4], в частности, для развития моделей и методов космического землеведения [5]. Пространственный анализ давно рассматривается как важное теоретическое направление развития географической науки [6].

Физическая интерпретация планетарных процессов и явлений представлена в книге М.М. Ермолаева [7]. По его мнению, объект изучения физической географии — это поверхность планеты и непосредственно примыкающее к ней пространство, названное географической оболочкой Земли. Задача состоит в выявлении и количественном изучении механизмов и результатов взаимодействия компонентов этой оболочки на фоне внутренних и внешних факторов влияния, что приводит к закономерному распределению географических объектов.

Комплексно-географический подход восходит к трудам А. Гумбольдта и отражен в книгах по общему землеведению, в частности, в монографии Ф.Н. Милькова [8], рассматривающего землеведение в ряду страноведения и ландшафтоведения, предлагающих функционально-целостное представление о территориальных комплексах как о системах всеобщей связи.

Пространственно-временные формы и движения Земли предопределяют закономерности географического содержания [3, 9]. Это факты шарообразности Земли, вращения ее вокруг своей оси и Солнца, а также наклон земной оси, магнитное поле, рельеф земной поверхности и т. д.

Физико-географическое учение о геопространстве разрабатывалось М.М. Ермолаевым [7]. Он ставил задачу построения общей теории рельефа Земли, объясняющей известные орографические проявления. Представление о геопространстве как отношении порядка между географическими объектами остается наиболее распространенным [10]. Предполагается существование допустимых устойчивых географических форм, создающихся по принципу «центр—периферия» [11]. В связи с этим пространственные физические данные и знания первичны для понимания географических закономерностей [12].

С другой стороны, современная физика для иллюстрации своих представлений привлекает географические понятия [13], например, формирует учение о космическом ландшафте [14]. Здесь речь идет об изменчивости законов физики в разных областях Вселенной, и такой ландшафт характеризует пространство разных возможностей трансформации законов, превращения их в закономерности. Физики называют этот «ландшафт» вакуумом, который потенциально содержит все, что может произойти при его заполнении. Вакуум — среда, в которой законы физики и соответственно других наук принимают конкретную форму [14].

Данный подход реализуется в теории калибровочных полей, обеспечивающих инвариантность законов теории относительно калибровочных преобразований пространства. Подобный стиль рассуждения о связи объектов и их полевой среды не отличается у физиков и географов. Для географа геополе — это географическая среда, вычитание которой из наблюдаемой реальности позволяет выявить законы взаимодействия, а с другой стороны, — преобразовывать эти законы для локального применения с учетом среднего фона [15]. Географическая среда — это форма и норма существования ландшафтного поля Земли, на основе которого возникают разнообразные процессы и явления в географической оболочке.

В этом отношении проблемы землеведения родственны задачам пространственного анализа [16] — создание и реализация процедур обработки геоданных о локализованных объектах с целью выяснения особенностей размещения, тенденций изменения и закономерностей их связей. Особенность географических исследований в этой области — это вычленение пространственной неоднородности территории и учет «ошибок» — погрешностей [17], определенных различием между общими законами и их индивидуальным проявлением. Требуются специальные методы учета особенностей местоположения, обеспечивающие своеобразную географическую точность геопространственного анализа [18, 19]. Необходимо понять, как формируются географические поля, как они влияют на облик планеты, и выделить их особенности по конкретным наблюдениям.

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Предполагается, что географические поля не только имеют геофизическую пространственно-временную природу, но и существуют также в многомерном пространстве признаков [20]. Задача их описания решается путем индукции новой теории поля на основе понятий и аксиом общей теории систем со специальной интерпретацией элементов и связей. Помимо физико-механической трактовки свойств геопространства, выделяется еще два самостоятельных направления — моделирование дискретных и непрерывных структур в виде регматической сети линеаментов земной коры и векторных полей географических явлений.

Первый тип моделей основан на фрактально-иерархической триангуляции и координации земной поверхности в виде грид-структур — систем дискретных узлов и связывающих их линий [21]. Во втором случае в пространственной системе элементы непрерывных полей представляют собой векторы, вовлеченные в вихревые взаимодействия типа синоптических полей скорости ветра в атмосферных вихрях — циклонах и антициклонах, особенности которых естественным образом определяются вращением Земли и действием силы Кориолиса [22].

Теория векторных полей создается подобно общей теории систем [20] путем замены общих понятий на специальные. Универсальные системы (универсумы) объединяют всевозможные системы данного рода, например, географические процессы и явления на Земле, что соотносится с главным объектом исследования землеведения. Тип универсума определяет предмет исследования, например механические или полевые процессы. В первом случае действие — это сила, вызывающая движение тел, во втором — ротация (кручение) поля, безотносительного к свойствам физических тел, например, взаимодействие электрического и магнитного полей, определяющих силы действия на заряженные частицы. Важность ротационных движений для понимания закономерностей формирования земных процессов и явлений подчеркивают специалисты разных наук, основываясь на эмпирических данных и результатах теоретического анализа [23, 24].

Земля в векторной интерпретации законов общей теории систем описывается на основе следующих постулатов [20]: инвариантного существования геоцентрической инерциальной системы отсчета — системы координат (ГИСК); вращения шарообразной планеты вокруг своей оси; неоднородного многослойного строения планеты; увеличения размеров планеты со временем; временного изменения векторных полей как результата их ротационного взаимодействия. Третий постулат рассматривает земное пространство как неоднородную радиально-слоистую структуру, что определяет формирование известных физико-географических явлений: магнитного поля, волноводов распространения акустических и радиоволн. Четвертый принимает гипотезу расширяющейся саморазвивающейся Земли [25–28], по-своему объясняющую долговременные эволюционные изменения на планете. По причине эволюции планетарной системы в рамках теоретического землеведения недостаточно рассматривать только физические поля, а требуется учесть еще и поля взаимодействия направленных географических процессов, отражающих эволюционную динамику планеты и коррелятные изменения компонентов зональных и а зональных геосистем [20].

В основе формирования векторного пространства Земли лежит астрономическая геоцентрическая инерциальная система отсчета с декартовыми координатами  $(x, y, z)$  и с линейным однородным ходом времени  $t$ . В качестве начала координат  $O$  здесь выбран центр массы Земли. Различаются эклиптическая и экваториальная системы небесных координат. В первом случае фундаментальная (основная) координатная плоскость  $(x, y)$  лежит в плоскости эклиптики — плоскости орбиты системы Земля–Луна, во втором — в плоскости земного экватора. Эти плоскости повернуты относительно друг друга на угол  $\varepsilon = 23^\circ 26'$ . Эклиптическая система координат более универсальна, поскольку позволяет учесть вращение планеты, а также долговременное изменение ориентации земной оси (прецессию и нутацию) и, соответственно, эффекты миграции географических полюсов. Экваториальная система удобна тем, что ее сферические координаты связаны с географическими — широтой  $\varphi$  и долготой  $\lambda$ , которые пересчитываются в декартовы координаты  $(x, y, z)$  неинерциальной системы отсчета (ГНСК), что перемещается и вращается вместе с Землей:

$$x = R_s \cos \varphi \sin \lambda, \quad y = R_s \cos \varphi \cos \lambda, \quad z = R_s \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $R_s$  — радиус земной сферы. Выбирается такая система координат, которая обеспечивает полноту и простоту расчетов связей географических явлений.

В физико-географической ГНСК ось  $z$  совпадает с осью вращения Земли с направлением на север. Оси  $x$  и  $y$  находятся в экваториальной плоскости, их ориентацию необходимо определять не

формально, а основываясь на естественной организации пространства планеты. В первом приближении [20] направление оси  $y$  определяется плоскостью круга двух эпейрогенических меридианов  $105^\circ$  в. д. и  $75^\circ$  з. д., к которым приурочены максимумы подъема литосферы, а ось  $x$  перпендикулярна этой плоскости и проходит по направлению  $165^\circ$  з. д. через глубины Тихого океана. Такая система координат обусловлена проявлением трехосности формы Земли, эллиптичностью экватора [29, 30]. А.Ю. Ретеюм [31], опираясь на данные статистики географических явлений планетарного масштаба, уточнил возможные направления осей континентального  $y$  ( $102^\circ$  в. д. —  $78^\circ$  з. д.) и океанического  $x$  ( $168^\circ$  з. д. —  $12^\circ$  в. д.) направлений.

Плоскость эклиптики стабильна относительно удаленных звезд, поэтому эклиптическую ГИСК можно считать инвариантной вращению Земли и в целом всем пространственным изменениям планеты в прошлом и в настоящем. В ГИСК ось  $z$  не совпадает с современным положением оси вращения и смещена на угол  $\varepsilon$  примерно как в октаэдрической схеме глобальных конвекционных течений на уровне кровли астеносферы Земли [32, 33].

Векторное пространство ГИСК формируется как ортогональная система координат  $\mathbf{P} = (x, y, z, t)$  с выделенными элементарными векторами (ортами)  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  по каждому направлению  $\mathbf{x} = ix, \mathbf{y} = jy, \mathbf{z} = kz$  и циклическому времени  $\mathbf{t} = wt$ , где  $t$  — линейное физическое время,  $\mathbf{w}$  — вектор угловой скорости вращения Земли  $\mathbf{w} = kw$ ;  $w$  равно числу оборотов планеты за единицу времени (за сутки). В связи с этим время  $t$  также исчисляется числом оборотов Земли вокруг своей оси и измеряется в сутках. Суточное положение каждой точки планеты определяется радиус-вектором  $\mathbf{r} = \mathbf{x} + \mathbf{y} + \mathbf{z}$ , исходящим из начала координат — условного центра Земли, и фазой вращения  $t$ . Расстояние точки от этого центра равно модулю вектора  $r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  (рис. 1, а).

Двойственное глобальному внешнему пространству  $\mathbf{P}$  пространство локальных внутренних эволюционных координат  $\mathbf{R} = (\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d})$  задается симметрично путем удвоения числа координат  $\mathbf{P} = (x, y, z, t)$ . Восьмерное геотопологическое пространство движения и развития планеты определяется вектором

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} + \mathbf{R} = \mathbf{P} + \mathbf{e} \times \mathbf{P} = wt + xi + yj + zk + a\mathbf{I} + b\mathbf{J} + c\mathbf{K} + d\mathbf{W},$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{e} \times \mathbf{i}, \mathbf{J} = \mathbf{e} \times \mathbf{j}, \mathbf{K} = \mathbf{e} \times \mathbf{k}, \mathbf{W} = \mathbf{e} \times \mathbf{w},$$

где  $\mathbf{e}$  — единичный вектор, ортогональный векторам пространства  $\mathbf{P}$ .

Двойственные координаты соответствуют интенсивности и направленности экзогенных ( $\mathbf{a}$ ) и эндогенных ( $\mathbf{c}$ ) геофизических процессов, биологической ( $\mathbf{b}$ ) и социальной ( $\mathbf{d}$ ) эволюции [20]. Сим-

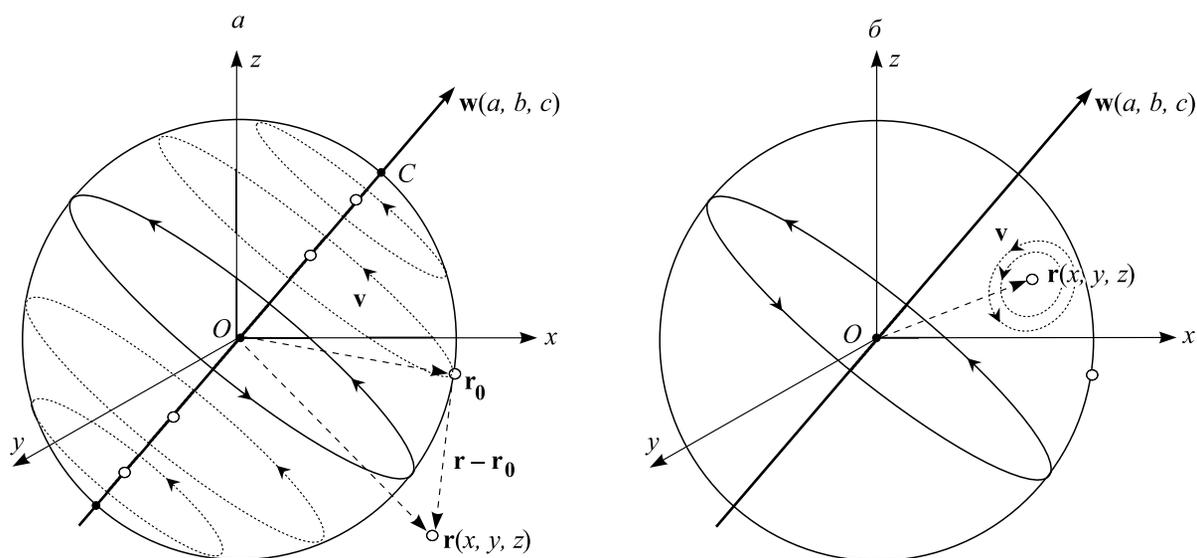


Рис. 1. Представление положения объектов  $\mathbf{r}(x, y, z)$  в эклиптической геоцентрической инерциальной системе координат  $(x, y, z)$  с проявлением физических закономерностей вращения земного эллипсоида со скоростью  $\mathbf{v}$  вокруг своей оси  $\mathbf{w}(a, b, c)$  (а) и циклонического вращения эволюционного поля вокруг радиус-вектора  $\mathbf{r}(x, y, z)$  в локальной окрестности — плоскости горизонтального сечения, касательного к уровневой поверхности в конкретной точке  $\mathbf{r}$  (б).

метрия физического  $\mathbf{P} = (x, y, z, t)$  и эволюционного  $\mathbf{R} = (a, b, c, d)$  пространств на Земле проявляются, в частности, в компенсационных процессах, когда в северных широтах ( $z > 0$ ) имеется тенденция к поднятию земной коры ( $c > 0$ ), а на тех же широтах в южном полушарии ( $z < 0$ ) наблюдается компенсационное опускание ( $c < 0$ ).

Многие географические эффекты связаны с суточным вращением Земли, ось которого в ГИСК задается вектором

$$\mathbf{w} = a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k}. \quad (2)$$

Здесь значения эволюционных координат ( $a, b, c$ ) связываются с положением географических полюсов, а наклон оси вращения — с преобразованиями разного масштаба, от эволюционных изменений до внутрисуточной динамики планеты.

Векторное поле задается системой векторов для каждой точки пространства. Например, векторным полем является поле линейных скоростей точек планеты при вращении ее вокруг своей оси (2):

$$\mathbf{v}(x, y, z, a, b, c) = \mathbf{w} \times \mathbf{r} = (bz - cy)\mathbf{i} + (cx - az)\mathbf{j} + (ay - bx)\mathbf{k}. \quad (3)$$

На погруженные в это поле материальные объекты массой  $m$  действуют различные фиктивные силы инерции, например центробежная  $\mathbf{F} = m\omega^2 \cos \varphi \mathbf{r}$  или сила Кориолиса  $\mathbf{F} = -2m[\mathbf{w} \times \mathbf{v}]$ . Пространственные движения как бы «увлекают» связанные с пространством объекты и определяют их текущие изменения.

Симметричная замена переменных в уравнении (3) дает поле скоростей эволюционных процессов:

$$\mathbf{V}(a, b, c, x, y, z) = (yc - zb)\mathbf{I} + (za - xc)\mathbf{J} + (xb - ya)\mathbf{K}. \quad (4)$$

Кручение этого поля определяется координатным вектором ротации поля  $\mathbf{V}$ :

$$\mathbf{W} = \text{rot } \mathbf{V}/2 = x\mathbf{I} + y\mathbf{J} + z\mathbf{K}, \quad (5)$$

сопряженным с радиус-вектором  $\mathbf{r}$  географического положения:  $\mathbf{W} = \mathbf{e} \times \mathbf{r}$ ,  $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$ . Это означает, что эволюционное поле как бы вращается вокруг каждой точки географического пространства (локального эпицентра), а след этого вращения проявляется в местных процессах по каждой эволюционной компоненте (см. рис. 1, б). Такие структуры наглядно наблюдаются со спутников в виде застывших кольцевых и вихревых структур рельефа [34, 33] или подвижных циклонических образований атмосферы [22]. Имеется возможность частично восстановить эволюционные поля вращательным смещением карты контуров географических границ относительно выделенных эпицентров [35, 36], благодаря чему проявляется неоднородное строение эпигенетического ландшафта как результат наложения множества круговых структур с разными эпицентрами. Это происходит по аналогии с моделями В. Кристаллера и А. Лёша [37], в которых центральные города организуют окружающие малые населенные пункты.

Векторные линии поля скоростей движения и эволюции являются решением следующей системы уравнений при разных константах  $C$ :

$$\text{а) } x^2 + y^2 + z^2 = C_1^2, \quad \text{б) } ax + by + cz = C_2, \quad \text{в) } a^2 + b^2 + c^2 = C_3^2. \quad (6)$$

Уравнение (6, а) описывает множество вложенных сфер (уровневых поверхностей) разного радиуса  $C_1$  в физическом пространстве, а уравнение (6, в) — сфер радиуса  $C_3$  в эволюционном пространстве. Уравнение (6, б) соответствует секущим эти сферы плоскостям по нормали к осям вращения. Сечения выделяют векторные линии, на которых задаются меридиональные положения и скорости.

Константы определяются по граничным условиям — координатами узловых точек  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$  и  $\mathbf{w}_0 = (a_0, b_0, c_0)$ , выделенных на поверхности сфер. Для уравнения (6, б) для произвольных ( $a, b, c$ ) получаем:

$$ax + by + cz = ax_0 + by_0 + cz_0 = C_2(x_0, y_0, z_0), \quad (7)$$

или в смещенных координатах (калиброванных переменных):

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0. \quad (8)$$

В пространственную систему погружаем объекты с разными географическими характеристиками, формирующими скалярное поле  $p(\mathbf{r}) = p(x, y, z)$ , например поле атмосферного давления. Касательные плоскости к этому многообразию в точке  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$  определяются уравнением

$$p - p_0 = a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0), \\ a = \frac{\partial p}{\partial x}, \quad b = \frac{\partial p}{\partial y}, \quad c = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad p_0 = p(x_0, y_0, z_0). \quad (9)$$

Например, уравнение касательной плоскости к полю давления — это скалярное произведение  $(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \cdot \text{grad}(p)$  вектора градиента  $\text{grad}(p)$  этого поля в выделенной точке  $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$  на радиус-вектор положения  $(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$ , смещенного относительно  $\mathbf{r}_0$  (см. рис. 1, а). Параметры  $a = a_0$ ,  $b = b_0$ ,  $c = c_0$  — значения градиентов поля  $p(x, y, z)$  по каждой координате и  $p_0 = p(x_0, y_0, z_0)$  — значение поля в точке  $\mathbf{r}_0$ . Величина  $p_0$  рассматривается в качестве константы уровневой поверхности поля  $p(x, y, z)$ , например изобарической поверхности поля давления. При  $p = p_0$  уравнение (9) переходит в (8), определяя сечения соответствующего поля  $p(x, y, z)$ .

Аналогичные (9) соотношения при  $a^2 + b^2 + c^2 = a_0^2 + b_0^2 + c_0^2$  выстраиваются в эволюционном пространстве

$$P(a, b, c) - P_0 = x(a - a_0) + y(b - b_0) + z(c - c_0),$$

$$x = \frac{\partial P}{\partial a}, \quad y = \frac{\partial P}{\partial b}, \quad z = \frac{\partial P}{\partial c}, \quad P_0 = P(a_0, b_0, c_0) \quad (10)$$

и проявляются в виде вложенных круговых структур в окрестностях точки с координатами  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  (см. рис. 1, б). Величину  $P(a, b, c)$  имеет смысл трактовать как давление, напряжение среды, индикативный параметр, зависящий от эволюционно-динамических показателей  $(a, b, c)$ .

Симметрия, связанная с заменой переменных и функций  $p(x, y, z)$  и  $P(a, b, c)$  в соотношениях (9), (10), следует из аналитического преобразования Лежандра

$$p(x, y, z) = ax + by + cz - P(a, b, c) \quad (11)$$

при а)  $P(a, b, c) = -p_0 + ax_0 + by_0 + cz_0$ , б)  $p(x, y, z) = -P_0 + a_0x + b_0y + c_0z$ . (12)

Здесь  $p(x, y, z)$  и  $P(a, b, c)$  — нелинейные функции, описывающие поверхность многообразия связей переменных. Они используются в качестве системообразующих функций связи компонентов векторов местоположения в глобальном внешнем  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  и локальном внутреннем  $\mathbf{a} = (a, b, c)$  подпространствах планеты.

С учетом этих преобразований уравнения (6, а) и (6, в) выражаются в виде

$$а) \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2 = C_3^2, \quad б) \left(\frac{\partial P}{\partial a}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial b}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial c}\right)^2 = C_1^2. \quad (13)$$

Первое известно как уравнение эйконала [38]. В теоретической механике эйконал  $p$  движения возникает при нулевой массе, т. е. в чисто геометрической системе связей. Это уравнение широко используется в геометрической оптике и акустике. Базовая модель анализа здесь представляет собой пучки пересечения линий, плоскостей, лучей, связей и т. д. В частности, Д.Л. Арманд [39] трактовал локальную географическую закономерность как результат пересечения разных законов природы. Пучки линеаментов регматической сети также имеет смысл рассматривать с геометрических позиций.

Эйконал  $\psi$  появляется в уравнении  $\Phi(t, \mathbf{r})$  для компонентов волновых полей разной природы и характеризует фазу  $\psi$  волны:

$$\Phi(t, \mathbf{r}) = A\Phi_t(t) \Phi_r(\mathbf{r}) = Ae^{i\psi} = A \cos \psi + iA \sin \psi, \quad \psi = \mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t + \psi_0, \quad (14)$$

где  $A$ ,  $\omega$  — амплитуда и частота волны;  $\Phi_t(t) = e^{-i\omega t}$  и  $\Phi_r(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\mathbf{r} + \psi_0}$  — временная и пространственная составляющие волновой функции;  $\mathbf{k} = \omega\mathbf{n}/c$  — волновой вектор  $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$ ,  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$  — единичный вектор в направлении распространения волны со скоростью  $c$ ;  $\psi_0(\mathbf{r})$  — фазовое смещение, индивидуальное для каждой точки пространства. Градиентный вектор  $\mathbf{k} = \text{grad}\psi = \nabla\psi$  определяет направление луча распространения фронта волны, соответствующего волновой поверхности при  $\psi = \text{const}$ , поэтому градиент эйконала направлен вдоль луча. Вектор  $\mathbf{n}$  отражает неоднородность среды, его значение  $n$  — коэффициент преломления луча.

При учете фазового смещения  $\psi - \psi_0 = \mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t$  соотношения (14) не зависят от локальных условий  $\psi_0$ . В физике поля, обеспечивающие инвариантность теории относительно фазовых преобразований, называются калибровочными. Классическая теория калибровочного поля может рассматриваться в чисто геометрическом аспекте [40, 41]. Такие поля отвечают за инвариантность преобразований в сложных пространствах внутренних степеней свободы [42]. Здесь есть прямая аналогия с полем географической среды, которое действует локально, и его учет в закономерностях связи процессов и явлений приводит к универсальным законам, не зависящим от средового параметра.

Общее уравнение эйконала при  $p = c\psi/\omega$  и  $p(\mathbf{r}) = \mathbf{n}\mathbf{r} + P(\mathbf{n})$  приводится к виду (13, а) при  $C_3 = n$  после отделения в (14) функции временной составляющей:

$$(\nabla p)^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)^2 = n^2. \quad (15)$$

Выражение  $p = \mathbf{n}\mathbf{r} - P$  является решением (15) и соответствует (9) при условии (12а) и  $\mathbf{n} = \mathbf{a} = (a, b, c)$ . Величина  $P = P(\mathbf{n})$  имеет смысл углового эйконала, определяющего фазовое смещение (калибровку) величины  $p(\mathbf{r})$ .

При постоянном значении  $n$  для (15) справедлива система канонических уравнений Гамильтона, из которой следуют уравнения парной связи координат точек лучей по различным направлениям  $\mathbf{n}$ :

$$y - y_0 = \frac{n_y}{n_x}(x - x_0), \quad z - z_0 = \frac{n_z}{n_x}(x - x_0) \quad (16)$$

— это пучки лучей (линий) в плоскости, касающейся в точке  $(x_0, y_0, z_0)$  некоторой поверхности  $K(x, y, z)$ . Такая поверхность, огибающая плоскости прохождения лучей, в геометрической оптике называется каустикой, а в математике — многообразием. В географии она может трактоваться как нормальная среда реализации разных функциональных причинно-следственных связей.

При постоянном коэффициенте преломления лучевые линии являются прямыми, а в том случае, если величина  $n(\mathbf{r})$  зависит от координат положения  $(x, y, z)$  (анизотропное пространство), линии сильно искривлены [43], что на Земле проявляется, например, в рефракции света или в виде миражей.

Наблюдается аналогия между причинно-следственными связями характеристик природных систем и законами геометрической оптики [20]. Природные связи, как правило, описываются нелинейными степенными зависимостями  $v(u)$ , сводящимися к линейному виду  $b(a)$  после логарифмирования:

$$v = Au^B, \quad b = Ba + C, \quad a = \ln u, \quad b = \ln v, \quad C = \ln A, \quad (17)$$

в частности, аллометрические закономерности, отражающие соотношения неравномерно растущих частей и функций организмов [44].

По аналогии для эйконала  $P(\mathbf{a})$  получаем уравнения:

$$\text{а) } b - b_0 = \frac{y}{x}(a - a_0), \quad \text{б) } c - c_0 = \frac{z}{x}(a - a_0). \quad (18)$$

Это пучок (конгруэнция) линий функциональных связей характеристик  $c(a)$  с центром пучка  $(a_0, b_0, c_0)$  — точкой касания плоскостью пучка среднего многообразия  $K(a_0, b_0, c_0)$  внутреннего пространства характеристик локальных геосистем  $(a, b, c)$ . Особенности взаимосвязей в простом варианте определяются координатами географического положения  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ . При расчетах сначала сравниваем переменные показатели  $c(a)$  различных местоположений  $c = \alpha a + \beta$ , оцениваем коэффициенты парной регрессии  $\alpha$  и  $\beta$  и, согласно (17), рассчитываем значения  $a_0$  и  $c_0$  из соотношений  $\beta = \alpha a_0 + c_0$ . Так решается задача выявления полей неоднородности  $c_0(a_0)$  взаимодействия географических характеристик  $c(a)$  и восстановления соответствующего геосредового многообразия  $c_0(a_0)$  (подобия каустики) по результатам анализа связей атрибутов глобальных пространственных данных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчетов использовались ряды пространственно-временных метеорологических данных проекта NCEP/NCAR Reanalysis Национальных центров по прогнозированию окружающей среды (NCEP) и Национального центра атмосферных исследований (NCAR). Проект предоставляет результаты ассимиляции данных в узлах регулярной сетки  $2,5 \times 2,5^\circ$  с 1948 г. по настоящее время. Для обработки выбраны среднесуточные значения скалярных полей абсолютной температуры (К) и удельной влажности воздуха (г/кг) на изобарической поверхности  $p_0 = 700$  гПа за разные месяцы 2014 г. Это примерно соответствует высоте 3 км над ур. моря, что позволяет минимизировать влияние факторов подстилающей поверхности.

Динамическое состояние атмосферы прежде всего зависит от неравномерного распределения тепла, обуславливающего неоднородность поля атмосферного давления, градиенты которого влияют на перенос воздушных масс, включая их водную составляющую. Для описания взаимодействия параметров атмосферы вводится система внутренних параметров-координат. При описании состояния атмосферы и других компонентов (геосфер) глобальной геосистемы используются различные размерные показатели. Для избавления от размерности и приведения показателей  $Z$  к сопоставимому виду применяется нормирование по константе  $Z_0$  и логарифмирование:  $\ln(Z/Z_0) = \ln Z - \ln Z_0 = a - a_0$ .

Затем проводится сравнение полученных величин по уравнению (18) и рассчитываются значения  $(a_0, b_0, c_0)$ , характеризующие среду  $a_0 = \ln Z_0$  взаимодействия параметров  $(a, b, c)$ .

Температура воздуха  $T$  определяется потоком солнечной энергии, поэтому ее сопоставляем с экзогенной переменной  $a = \ln(T)$ . Удельная влажность  $H$ , связанная с осадками, выбрана в качестве эндогенной переменной  $c = \ln(H)$ ; она явно не зависит от температуры воздуха, поскольку термический показатель не используется при ее определении. В итоге исследуется климатическая зависимость  $H(T)$  вида (18) в логарифмической шкале значений. Линейный регрессионный анализ этой зависимости  $c = \alpha a + \beta$  проводится по нескольким дням разных сезонов 2014 г. в скользящем режиме по четырем точкам в интервале широты  $10^\circ$ . Для каждого интервала рассчитываются значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , которые сравниваются по всем координатам широты конкретной долготы (шаг  $2,5^\circ$ ) для выявления линейной связи  $\beta = -a_0\alpha + c_0$  и показателей нормы состояния среды  $T_0 = \exp(a_0)$ ,  $H_0 = \exp(c_0)$ . Например, на 1 июля 2014 г. на долготе  $105^\circ$  разные варианты коэффициентов связи переменных (18) упорядочены по широте уравнением  $\beta = -5,62\alpha - 5,33$ ,  $R = 0,88$ , т. е. на этой долготе средовая норма влажности  $H_0 = 0,0048$  г/кг, а норма температуры  $T_0 = 274,9$  К. По долготе зависимость  $H_0(T_0)$  отсутствует, поскольку в этом случае величина  $T_0$  постоянна (варьирование 2,3 %), а значения  $H_0$  сильно (84 %) изменяются.

Напротив, по широте связи  $H_0(T_0)$  и  $c_0(a_0)$  проявляют тенденцию изменения (рис. 2): почти линейный рост влажности от самых низких значений температуры 235 К идет примерно до 265 К, а затем есть небольшое увеличение  $c_0$  при росте температуры до 285 К. Низкие значения фоновых (средовых, нормальных) температуры и влажности приходятся на зимнее время в высоких широтах, а постоянная влажность соответствует океанической экваториальной области. Средовая зависимость  $c_0(a_0)$  на рис. 2 характеризует многообразие климатических сред (норм), на базе точек которого в каждой локальной области планеты формируется пучок конкретных линейных связей  $c(a) = \alpha(a - a_0) + c_0$  логарифмических значений влажности  $H$  и температуры воздуха  $T$  с изменяющимися значениями  $\alpha$  (см. рис. 2). Пучок линий  $c(a)$  прикреплен к средовым показателям  $(a_0, c_0)$ , а направление  $\alpha$  линий в плоскости  $(a, c)$  зависит от влияния других неучтенных факторов, определяющих пространственную и функциональную неоднородности географических условий проявления связей  $H(T)$  и  $c(a)$ .

Коэффициенты неоднородности связи  $\alpha$  уравнения  $c(a) = \alpha(a - a_0) + c_0$  на высоте 3 км над землей в широтном направлении наиболее изменчивы в районе экватора. В пространственном изменении положительных и отрицательных значений  $\alpha$  проявляются планетарные широтно-зональные и высотно-поясные закономерности (рис. 3). Участки отрицательного влияния вытянуты в основном в меридиональном направлении. Хорошо просматривается зона песчано-каменистой Аравийской пустыни и пустыни Сахара Северной Африки, а также пустынь Австралии, где большая часть влаги осадков задерживается горными хребтами. Значение  $\alpha < 0$  характерно также для высокогорий Северо-Восточной Азии с выраженной вертикальной дифференциацией ландшафтов.

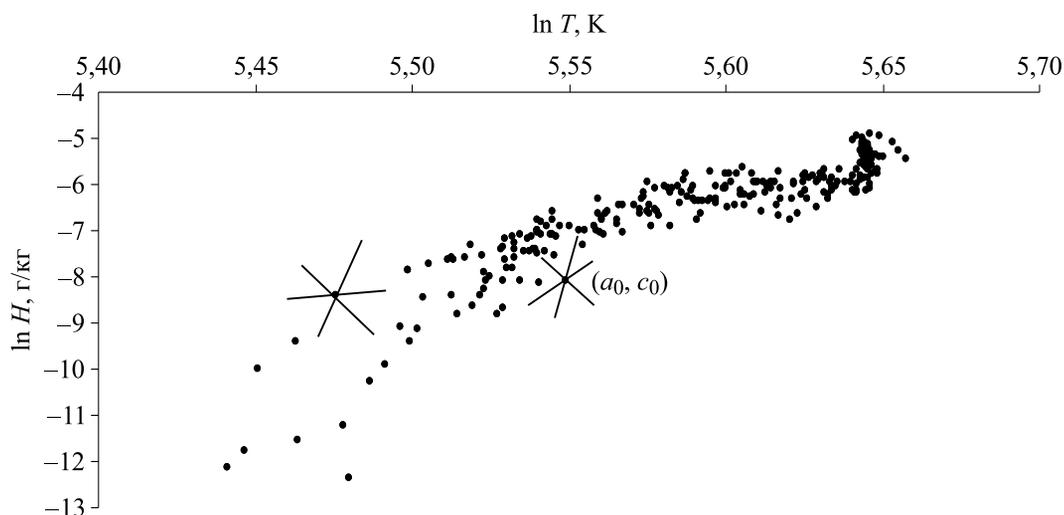


Рис. 2. Зависимость широтной нормы удельной влажности  $c_0 = \ln H_0$  от нормы абсолютной температуры  $a_0 = \ln T_0$  по дням января, марта, июля и октября 2014 г.

Точки соответствуют расчетным значениям средовой зависимости  $c_0(a_0)$ , пересекающиеся линии — пучки линейной зависимости  $c - c_0 = \alpha(a - a_0)$  с центром  $(a_0, c_0)$ .

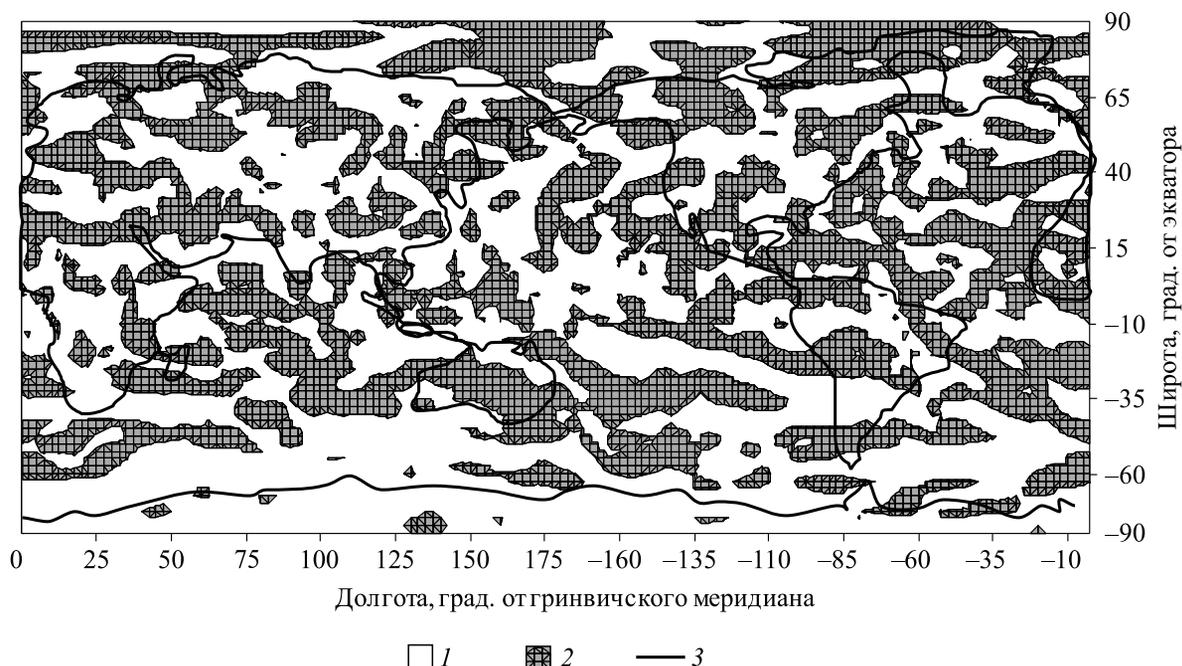


Рис. 3. Глобальное изменение коэффициента  $\alpha$  уравнения связи  $c(a) = \alpha(a - a_0) + c_0$  удельной влажности  $c$  и температуры  $a$  (логарифмический масштаб) на 1 июля 2014 г.

Зависимости  $c(a)$ : 1 — положительные ( $\alpha > 0$ ), 2 — отрицательные ( $\alpha < 0$ ). 3 — контуры материков.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любую наблюдаемую локальную связь можно трактовать как следствие циклического взаимодействия соответствующих полей в геофизическом пространстве и в пространстве характеристик географических процессов и явлений. Статистическая обработка глобальных данных позволяет выделить пучки зависимостей, центры которых указывают на точки касания линий связей характеристик с многообразием географической среды. Через средовое смещение обеспечивается геосистемная калибровка действия фундаментальных законов природы. Это определяет основную тематику землеведения — выявление проекции космических и планетарных циклов на локальные системообразующие закономерности.

Землеведческое исследование связи глобальных и локальных пространств необходимо для развития теории, моделей и методов геопространственного анализа зависимостей скалярных и векторных полей географических характеристик. Здесь реализуется теоретическая идея существования закономерностей как пучков расслоений на многообразиях геосреды. В дальнейшем это предполагает компьютерное отображение геосистемного многообразия в виде ландшафтно-типологических карт средовой неоднородности или дифференциации территории по типу связности пространственных параметров на картах районирования.

*Исследование выполнено за счет средств государственного задания АААА-А17-117041910167-0.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котляков В.М. Вклад географической науки в программы биосферных и экологических исследований в СССР // Изв. АН СССР. Сер. геогр. — 1988. — № 5. — С. 37–44.
2. Дьяконов К.Н., Ретеюм А.Ю. Новый курс землеведения // Структурно-динамические особенности, современное состояние и проблемы оптимизации ландшафтов. Материалы Пятой междунар. конф., посвященной 95-летию со дня рождения Ф.Н. Милькова. — Воронеж: Истоки, 2013. — С. 143–145.
3. Ласточкин А.Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория геосистем). — СПб.: Изд-во Ин-та химии Санкт-Петерб. ун-та, 2002. — 762 с.
4. ДеМерс М.Н. Географические информационные системы. Основы: Пер. с англ. — М.: Дата+, 1999. — 290 с.
5. Космическое землеведение: информационно-математические основы / Ред. В.А. Садовничий. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 571 с.
6. Хаггет П. Пространственный анализ в экономической географии. — М.: Прогресс, 1968. — 390 с.

7. Ермолаев М.М. Введение в физическую географию. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. — 260 с.
8. Мильков Ф.Н. Общее землеведение. — М.: Высш. шк., 1990. — 335 с.
9. Калесник С.В. Общие географические закономерности Земли. — М.: Мысль, 1970. — 282 с.
10. Трофимов А.М., Шарыгин М.Д. Общая география: вопросы теории и методологии. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2007. — 494 с.
11. Сухоруков В.Д. Геопространственная система: сущность и структурные аспекты // Изв. РГО. — 1998. — Т. 130, вып. 5. — С. 61–67.
12. Ласточкин А.Н. Общая теория геосистем. — СПб.: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 2011. — 955 с.
13. Тютюник Ю.Г. О феномене географии // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2010. — № 6. — С. 5–14.
14. Сасскинд Л. Космический ландшафт. Теория струн и иллюзия разумного замысла Вселенной. — СПб.: Изд. дом «Питер», 2015. — 448 с.
15. Лесных С.И., Черкашин А.К. Оценочные функции для интегрального картографирования // Геодезия и картография. — 2017. — № 3. — С. 28–33.
16. Геоинформатика / Ред. В.С. Тикунов. — М.: Академия, 2005. — 480 с.
17. Космачёв К.П. Географическая экспертиза: методологические аспекты. — Новосибирск: Наука, 1981. — 109 с.
18. Бакланов П.Я. Географические измерения: виды, шкалы, параметры // Укр. геогр. журн. — 2013. — № 2. — С. 17–22.
19. Черкашин А.К. Географическая точность и особенности метрологического моделирования геопространственных данных // Укр. метролог. журн. — 2014. — № 2. — С. 7–15.
20. Черкашин А.К. Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии. — Новосибирск: Наука, 1997. — 502 с.
21. Черкашин А.К., Китов А.Д. Системный анализ структуры географического пространства // Географические исследования Сибири. Т. 4: Полисистемное тематическое картографирование. — Новосибирск: Геос, 2007. — С. 271–287.
22. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 295 с.
23. Хаин В., Полегаев А. Ротационная тектоника Земли // Наука в России. — 2007. — № 6. — С. 14–21.
24. Ротационные процессы в геологии и физике / Ред. Е.Е. Милановский. — М.: КомКнига, 2007. — 528 с.
25. Гораи М. Эволюция расширяющейся Земли. — М.: Недра, 1987. — 112 с.
26. Блинов В.Ф. Растущая Земля: из планет в звезды. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 273 с.
27. Ретеюм А.Ю. Новая парадигма в науках о Земле // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2006. — № 2. — С. 138–139.
28. Бетелев Н.П. Концепция растущей Земли и некоторые проблемы тектоники, петрологии, литологии и нефтяной геологии // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2007. — № 1. — С. 40–44.
29. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. — М.: Наука, 1976. — 518 с.
30. Ерманов Ж.С., Калыбаев А.А. Общая теория вращения Земли. — 1984. — 254 с.
31. Ретеюм А.Ю. Восточно-Сибирский планетарный очаг // Материалы XIII Науч. совещ. географов Сибири и Дальнего Востока. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН. — 2007. — Т. 1. — С. 183–184.
32. Irvine T.N. A global convection framework: concepts of symmetry, stratification, and system in the Earth's dynamic structure // Economic Geology. — 1989. — Vol. 84. — P. 2059–2114.
33. Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. — М.: Научный мир, 2003. — 348 с.
34. Юшманов В.В. Тектоно-магматические концентрические комплексы: теоретические, методические и практические вопросы изучения. — М.: Наука, 1985. — 233 с.
35. Лагерева Е.А., Тужикова Т.Н., Черкашин А.К. Векторное представление пространственно-временной структуры ландшафта // Экология ландшафта и планирование землепользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — С. 93–96.
36. Черкашин А.К. Геоинформационная система как инструмент познания // Proceedings, InterCarto9 International Conference. GIS for Sustainable Development of Territories. — Novorossijsk; Sevastopol, 2003. — P. 3–10.
37. Гранберг А.Г. Основы региональной экономики. — М.: Изд-во Гос. ун-та Высш. шк. экономики, 2000. — 495 с.
38. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 2: Теория поля. — М.: Наука, 1988. — 512 с.
39. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте. Основы теории и логико-математические методы. — М.: Мысль, 1975. — 286 с.
40. Коноплёва Н.П., Попов В.Н. Калибровочные поля. — М.: Атомиздат, 1972. — 240 с.
41. Сарданашвили Г.А. Современные методы теории поля. I: Геометрия и классические поля. — М.: Изд. группа URSS, 1996. — 224 с.
42. Утияма Р. К чему пришла физика. От теории относительности к теории калибровочных полей. — М.: Знание, 1986. — 224 с.
43. Боровских А.В. Двумерное уравнение эйконала // Сиб. математ. журн. — 2006. — Т. 47, № 5. — С. 993–1018.
44. Розен Р. Принцип оптимальности в биологии. — М.: Мир, 1969. — 215 с.

*Поступила в редакцию 21.03.2018*

*После доработки 02.04.2019*

*Принята к публикации 25.12.2019*