

# ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 551.435.8

## Районирование закарстованных территорий Калужской области с применением интегрального подхода с целью выявления благоприятных площадей для строительства

**С.В. Щербаков, З.В. Кивилева**

Пермский государственный национальный исследовательский университет

614990, Пермь, ул. Генкеля, д. 4. E-mail: shcherbakov.lpmg@mail.ru; zoya.kivileva@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 6 июня 2019 г.)

Рассмотрено 17 факторов природного строения территории Калужской области, разделенных на 4 группы: геологическую, гидрогеологическую, структурно-тектоническую и геоморфологическую. Проанализирована взаимосвязь между каждым фактором и развитием поверхностных карстовых форм. Определены законы распределения карстовых форм и граничные значения факторов, соответствующие интервалам с различной степенью опасности. Итоговая оценка карстовой опасности исследуемой территории проведена посредством ESRI ArcGIS 10 с применением интегрального подхода, максимально учитывающего роль каждого фактора в развитии карстового процесса.

Ключевые слова: *карстовые формы, карстоопасность, условия развития карста, факторы природного строения, интегральный подход, категория опасности.*

DOI: 10.17072/pсу.geol.19.3.247

### Введение

Вся территория Калужской области характеризуется развитием карста и, как следствие, форм его проявления на поверхности земли. Наибольшая концентрация карстовых форм отмечена на территории Сухиничского района, где их плотность достигает 7 шт./км<sup>2</sup>. Присутствие в геологическом разрезе карстующихся пород затрудняет выбор мест для строительства и эксплуатацию существующих объектов. Районирование территории области по карстоопасности и локализация площадей, благоприятных для целей гражданского и промышленного строительства, являются первостепенной задачей при их хозяйственном освоении.

Интегральный подход при оценке карстовой опасности, рассматриваемый далее в данной статье, дает возможность комплексного анализа всех факторов, влияющих на развитие карстового процесса (Дублянский, Дублянская, 1992; Соколова, 2010).

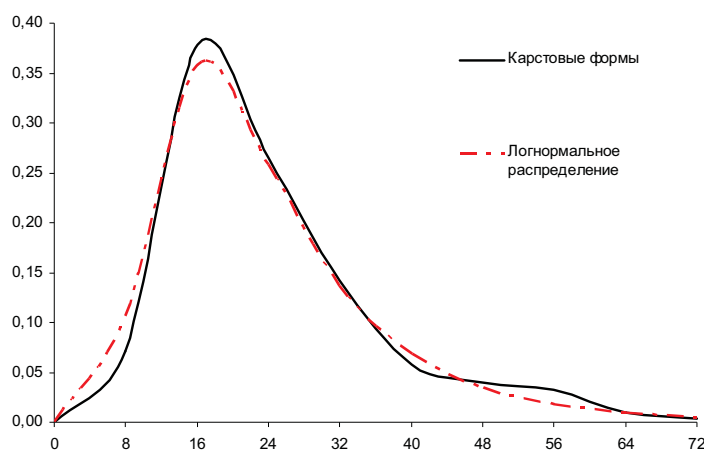
### Методика выполнения работы

В процессе интегральных построений математической статистической обработке подвергаются как сами карстопроявления, так и комплекс факторов, определяющих природные условия развития карстового процесса (Щербаков, 2013).

Влияние рассматриваемых факторов природного строения на интенсивность развития карста оценивается посредством их сопоставления с исследуемыми карстовыми формами (рис. 1). Целью сопоставления является установление эмпирических (рис. 2, черная кривая) и теоретических (рис. 2, красная штрихпунктирная кривая) распределений карстовых форм по значениям факторов природного строения. Для этого используются методы картографического и графического моделирования с последующей аналитической обработкой количественных данных.



**Рис. 1.** Пример картографического сопоставления факторов природного строения и карстовых форм: А – картографическая модель изменчивости значений исследуемых факторов; Б – на картографические модели «накладываются» рассматриваемые карстовые формы; В – присваивание каждой карстовой форме значения фактора в точке ее локализации



**Рис. 2.** Пример графического анализа распределений карстовых форм по факторам природного строения в виде кривых плотности распределения

По формам эмпирических кривых общих распределений подбираются наиболее подходящие теоретические распределения – нормальный, логарифмически нормальный, экспоненциальный. Эти распределения присущи практически всем природным элементам, что неоднократно подчеркивалось исследованиями многих авторов, а их использование оправдано простотой и удобством получения конечного результата. Наконец, точность прогнозирования с применением семейства нормального закона распределения является достаточно высокой, о чем свидетельствуют результаты ранее выполненных исследований (Хоменко, Толмачев, 1983; Щербаков, Катаев, 2011).

В данном случае критериальное доказательство схожести того или иного эмпирического распределения с теоретическим нор-

мальным законом позволяет одинаково оценивать интервалы максимальной локализации карстовых проявлений. Такие интервалы предлагается выделять, опираясь на правило «трех сигм (стандартных отклонений)», являющееся характерной особенностью как нормального, логнормального, так и экспоненциального распределений. Его суть заключается в том, что нормально распределенные значения исследуемого фактора или свойства заключены в интервале  $[-3\sigma; +3\sigma]$ . Соответственно все значения, выпадающие из этого интервала, считаются аномальными и не принадлежащими данному распределению.

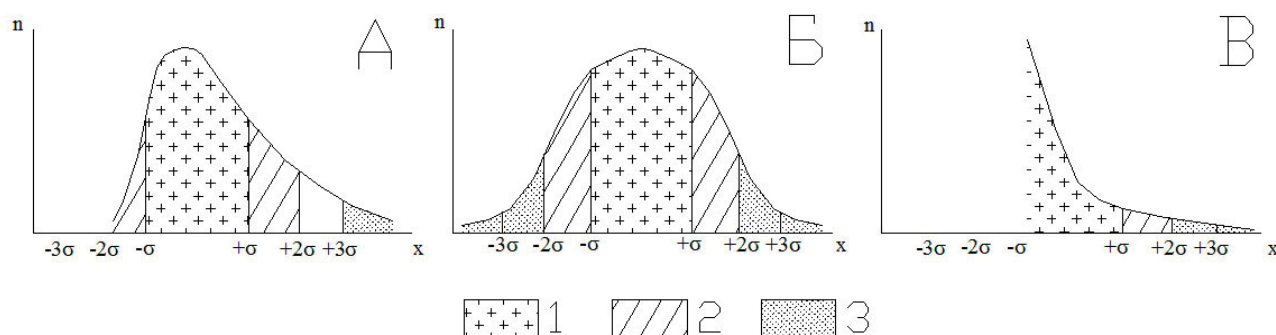
В практике отечественного карстологического районирования по степени устойчивости и карстоопасности к настоящему времени сложилась уже достаточно опробованная база ранжирования территории. Строитель-

ными нормами СП 11-105-97, ч. II предложено выделять 6 категорий устойчивости по интенсивности провалообразования и 4 категории устойчивости по диаметрам поверхностных карстовых деформаций. Некоторые территориальные строительные нормы (ТСН 11-301-2004), к сожалению, не имеющие на данный момент официального статуса, с учетом стадийности изысканий предлагают объединять данные категории устойчивости в 3 категории по степени карстоопасности: опасную, потенциально опасную и практически неопасную.

Выделение опасных интервалов с учетом правила «трех сигм» для нормального и логнормального законов распределения ведется от *среднего значения* путем прибавления или вычитания значения *среднеквадратического отклонения*  $\sigma$ . Для экспоненциального закона понижение или повышение опасности

фиксируется при постепенном отдалении от минимального значения фактора. В соответствии со всем вышесказанным при оценке карстовой опасности предлагается выделять 3 категории (рис. 3):

- опасная:  $[(-\sigma)-(+\sigma)]$  – для нормального и логнормального законов;  $[(0)-(+\sigma)]$  или  $[(+2\sigma)-(+\infty)]$  – для экспоненциального закона;
- потенциально опасная:  $[(-2\sigma)-(-\sigma)]$  и  $[(+\sigma)-(+2\sigma)]$  – для нормального и логнормального законов;  $[(0)-(+\sigma)]$  или  $[(+\sigma)-(+2\sigma)]$  – для экспоненциального закона;
- практически неопасная  $[(0)-(-2\sigma)]$  и  $[(+2\sigma)-(+\infty)]$  – для нормального и логнормального законов;  $[(0)-(+\sigma)]$  или  $[(+2\sigma)-(+\infty)]$  – для экспоненциального закона.



**Рис. 3.** Категории карстовой опасности по интервалам значений фактора на дифференциальной кривой распределения: А – логарифмически нормального, Б – нормального, В – экспоненциального; категории опасности: 1 – опасная, 2 – потенциально опасная, 3 – практически неопасная

Для удобства выполнения пространственного анализа каждая категория опасности и соответственно все интервалы значений фактора, соответствующие ей, кодируются определенным баллом.

Интегральный учет всех анализируемых факторов осуществляется путем пространственного наложения друг на друга и последующего суммирования переклассифицированных картографических моделей изменчивости отдельных рассматриваемых факторов развития карста, выраженных в балльной форме. Математически интегральный расчет записывается в следующем виде:

$$x = a_{St}x_{St} + a_Gx_G + a_{Hg}x_{Hg} + a_{Ge}x_{Ge},$$

где  $a_i$  – весовые коэффициенты,  $x$  – среднее

балльное значение опасности, определенное по факторам внутри каждой из выделенных групп:  $St$  – структурно-тектонической,  $G$  – геологической,  $Hg$  – гидрогеологической и  $Ge$  – геоморфологической.

Применение весовых коэффициентов в интегральной модели позволяет устанавливать уровень значимости частных оценок по каждой из отдельных групп факторов (Щербаков, 2014). Это справедливо в тех случаях, когда установлено, что в пределах исследуемой территории особая роль в развитии карстово-суффозионного процесса принадлежит факторам определенной группы или, например, факторы той или иной группы установлены весьма неоднозначно по малому количеству входных данных.

### Краткая характеристика природных условий Калужской области

Калужская область расположена в центральной части Восточно-Европейской равнины и граничит с Московской, Тульской, Брянской, Орловской и Смоленской областями. Площадь территории области составляет 29,9 тыс. км<sup>2</sup>. В ее состав входит 24 района и 2 города областного подчинения (Физическая география..., 2003).

Рельеф Калужской области представлен как низкими, так и возвышенными равнинами: высоты изменяются от 120 м и менее в долине р. Оки и до 279 м (Зайцева гора) над уровнем моря.

Большая часть области характеризуется ледниковой и водно-ледниковой формами рельефа, переработанными процессами эрозии и денудации.

На северо-востоке области, куда ледник практически не заходил, образовались эрозионные равнины. Среди небольших эрозионных форм преобладают неглубокие ложбины, имеющие пологие склоны и заболоченные днища. Склоны водоразделов и речных долин изрезаны глубокими долинами ручьев, балками и оврагами. По дну балок и оврагов протекают постоянные ручьи или оно заболочено.

На северо-западе области, охваченной оледенением, встречаются моренно-эрозионные и озерно-ледниковые равнины, а к югу от моренных равнин вдоль правобережья рек Вытебети и Жиздры распространены зандровые равнины.

После таяния ледника речные долины начали формироваться заново. Поэтому большинство речных долин слабо разработаны, особенно в верховьях рек, где наблюдается чередование узких и расширенных участков.

На территории Калужской области протекают 2043 реки общей протяженностью 11,7 тыс. км. Реки области относятся к бассейну Каспийского (р. Волга) и Черного (р. Днепр) морей. Среди крупных рек области стоит выделить Оку и ее притоки Жиздру, Угру и Протву. Реки характеризуются пойменными, V-образными, слабоизвилистыми долинами. Берега рек высокие и крутые, местами скалистые, склоны долин поло-

гие, сильно изрезаны оврагами и балками (Физическая география..., 2003).

Структура осадочного чехла тесно связана с фундаментом платформы. В нижней части чехла выявлены разрывные нарушения, а в верхней части над разломами – зоны повышенной трещиноватости пород.

На исследуемой территории четко выделяются три протяженные зоны повышенной плотности линейных структур (линеamentов) юго-восточного простирания и три примыкающие к ним – северо-восточного.

Кроме линейных дислокаций в осадочном чехле выделяются кольцевые структуры (рис. 4). Одна из наиболее крупных – Калужская кольцевая структура с диаметром кальдеры 13–15 км, ограниченной разломами, наклоненными к центру структуры.

Кроме неё на территории области наблюдаются еще две кольцевые структуры – Юхновская и Дугнинская. Они имеют эллипсоидный характер замкнутой депрессии и так же ограничены разломами (Бобров, 2006).

Геологический разрез Калужской области сложен двумя комплексами пород: *нижним* – кристаллическим фундаментом, сложенным метаморфическими образованиями, и *верхним* – осадочным чехлом, который залегает на кристаллическом фундаменте с резким угловым и стратиграфическим несогласием (Физическая география..., 2003; Бобров, 2006).

В строении осадочного чехла принимают участие глубоко погребенные образования вендской системы, отложения палеозоя (девон, карбон), широко, но не повсеместно распространенные отложения мезозоя (юра, мел), островки палеогена и миоцена, перекрытые чехлом четвертичных образований. Общая мощность осадочного чехла изменяется от 350 до 1500 м и более (Петров, 2003). Карстованию подвержены породы девонской и, в большей степени, каменноугольной систем, в связи с чем описание более древних отложений ниже не приводится.

Девонская система залегает на глубине 250–500 м. Франский ярус мощностью до 120 м представлен терригенно-карбонатными отложениями (глинистые известняки, мергели и глины). Фаменский ярус мощностью до 250 м представлен в основном доломитами, реже известняками, с терригенным



материалом в виде песчаника, аргиллита и прослоек глин, встречаются мощные прослои гипса до 16 м.

Каменноугольная система на территории области выделяется в объеме турнейского, визейского ярусов нижнего отдела и башкирского и московского ярусов среднего отдела, имеющих широкое распространение. Мощность каменноугольных отложений, равная в районе Боровска 200 м, к юго-западной окраине области снижается до нуля. Нижний отдел представлен терригенно-карбонатными отложениями: известняки, глины с прослоями алевроитов, песков и песчаников, а также промышленные залежи угля. Средний отдел – пестроцветными глинами с прослойками песков, песчаников, алевролитов и линзами известняков, доломитов.

Вся территория области является зоной эрозионного среза каменноугольных отложений. Именно с ними связана активность карстовых процессов в толще пород (зоны дробления, трещины, полости).

Юрская система на территории Калужской области выделяется в объеме батского и келловейского ярусов среднего отдела, а также оксфордского, кимериджского и титонского ярусов верхнего отдела. Мощность юрских отложений изменяется от 2 до 50 м. Система в основном представлена континентальными образованиями, состоящими из песчано-глинистых отложений, песчано-алевритистых глин с редкими прослоями мергеля и известняка.

Меловая система на территории области распространена неравномерно, отсутствует в северо-западной части. В строении системы принимают участие нижний и верхний отделы. Отложения представлены терригенными породами, в основном кварцево-глауконитовыми песками с мелкой галькой и гравием кремня и кварца, песчаниками, алевритистыми глинами и многочисленными конкрециями фосфоритов. В южных районах области на возвышенных участках водораздела распространены толщи мела туронского возраста.

Глинисто-терригенный состав юрско-меловых отложений играет существенную роль в развитии карстово-суффозионных явлений во многом благодаря своим водоупорным свойствам.

Отложения палеогеновой и неогеновой систем распространены в северной части Калужской области и приурочены к древним донеогеновым долинам, врезанным в нижне-каменноугольные отложения, представлены песками, супесями и глинами (Бобров, 2006).

Отложения четвертичной системы на территории области развиты практически повсеместно. Общая мощность отложений изменяется от 10–15 до 50–80 м. Широкое распространение имеют моренные отложения, представленные в основном суглинками с гравием, галькой и валунами осадочных и изверженных пород, разнозернистыми песками и супесями. Наименее распространены аллювиальные и озерные отложения – переслаивание разнозернистых песков с гравием и галькой, суглинков, супесей и глин (Бобров, 2006; Петров, 2003).

Согласно вышеприведенному описанию геологического строения приповерхностной толщи и его расчленения, в разрезе территории Калужской области было выделено 13 типов геологического строения. Первый и самый главный критерий, благодаря которому 13 типов были разделены на 2 большие группы, – это возраст карстующихся отложений. К первой группе разрезов относятся участки, в пределах которых карстующейся толщей являются каменноугольные отложения, ко второй – участки с карстующимися отложениями девона. Различные типы геологических разрезов характеризуются разнообразным сочетанием рассматриваемых слоев (рис. 5).

Коренное отличие 2–4 и 10–12 типов разреза от 5 и 13 типов – это присутствие прослоев юрско-меловых глинистых отложений мощностью от 2 м и более. Наличие в разрезе таких глинистых прослоев, согласно московскому опыту изучения карбонатного карста, кардинальным образом влияет на динамику протекания карстово-суффозионного процесса.

### **Карстовые формы и особенности их распространения**

К наиболее характерным формам поверхностных проявлений карста, вызывающим наибольшие осложнения при хозяйственном освоении территорий, относятся *карстовые*

воронки и локальные понижения. Среди подземных карстовых форм наибольшую опасность представляют полости и зоны дробления – интервалы, в пределах которых карстующиеся породы залегают в сильно нарушенном разуплотненном состоянии.

Изучение и оценка распространения отрицательных форм рельефа на территории

Калужской области осуществлены в результате:

– сбора, анализа и обобщения архивных материалов геологических, гидрогеологических, инженерно-геологических, структурных, геофизических и карстологических исследований, выполненных в 1952 – 2018 гг.

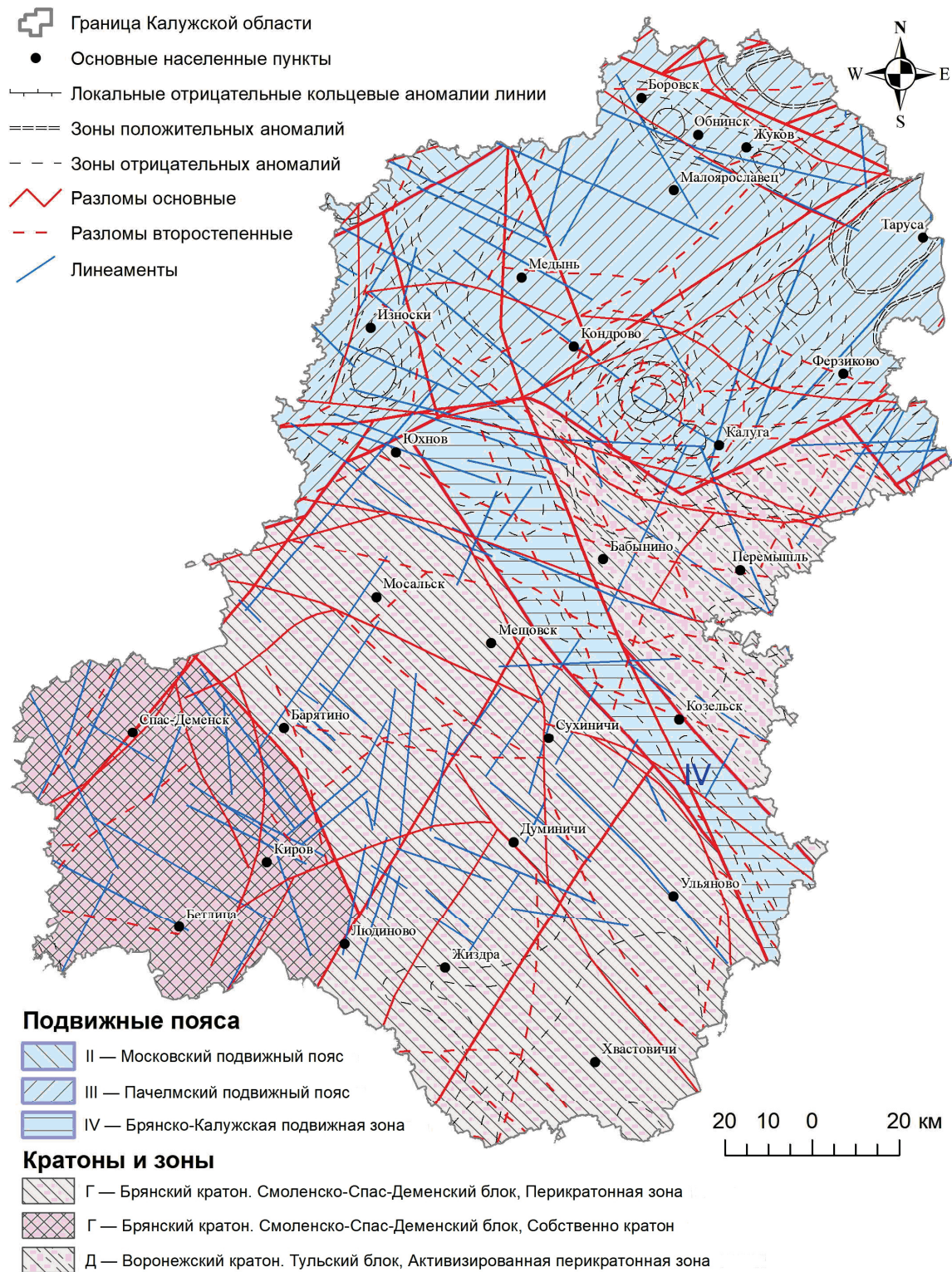


Рис. 4. Схема структурного районирования верхней части земной коры



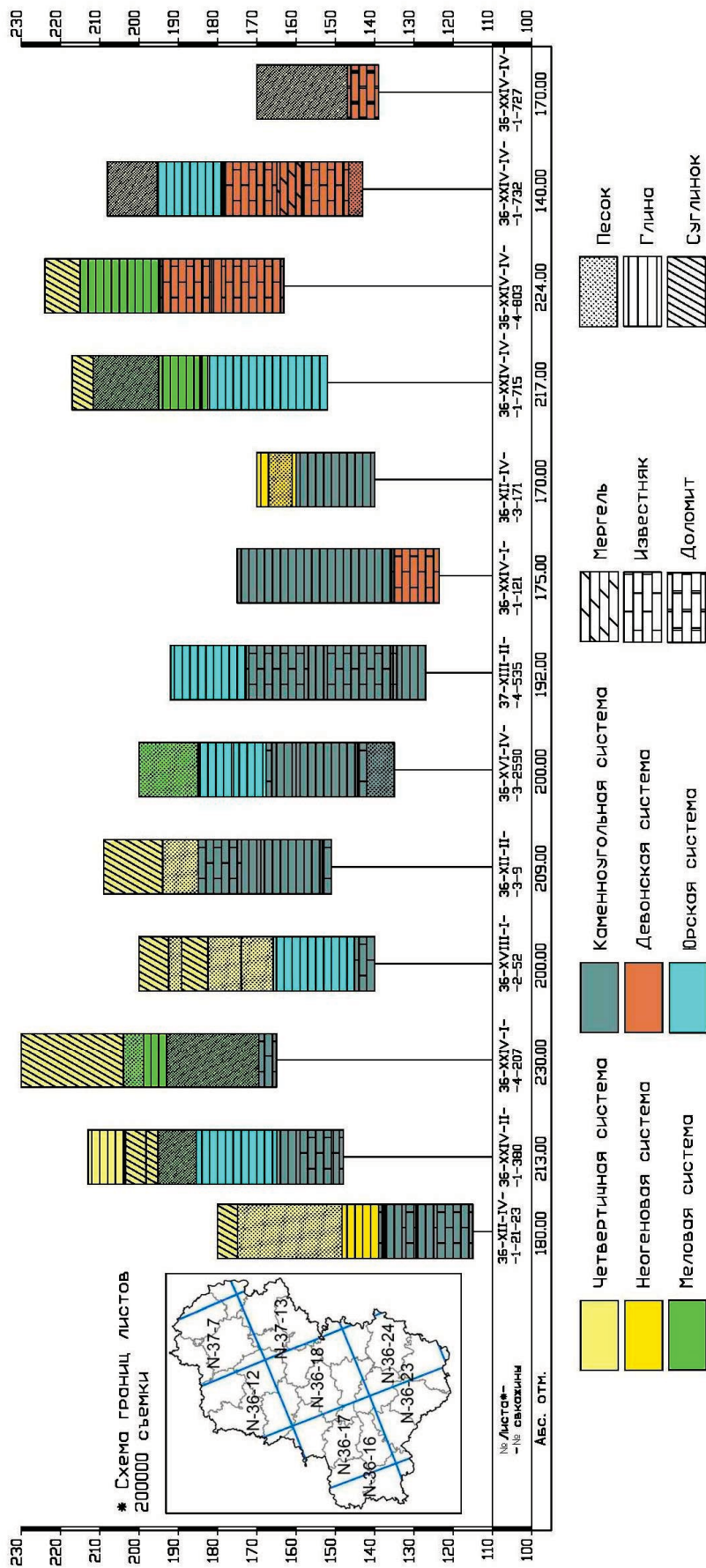


Рис. 5. Типы геологического разреза

различными организациями, хранящихся в ФГБУ «Росгеолфонд», ФБУ «ТФГИ по Центральному федеральному округу», Калужском филиале ФБУ «ТФГИ по Центральному федеральному округу». Из данных источников получены сведения о 110 карстовых воронках;

- анализа и дешифрирования топографических планов и карт масштаба 1:25 000 – 1:100 000. По данным материалам закартировано 1907 отрицательных форм рельефа;

- дешифрирования космических снимков высокой точности из различных источников (Google, Yandex, Here, Bing), отражающих ситуацию в разные временные периоды, для уменьшения ошибки. Также при дешифрировании карстопроявлений использованы спутниковые решения ГИС-центра ПГНИУ, позволяющие получать высокоточную спутниковую съемку поверхности земли в реальном времени. С использованием спутниковых данных выделено 4195 воронкообразных форм.

Отрицательные формы рельефа, прослеживающиеся на космоснимках и топографических картах, приурочены главным образом к центральной части области, где их плотность превышает 1 шт./км<sup>2</sup>, а в Сухиничском районе достигает 7 шт./км<sup>2</sup> (рис. 6).

Подземная закарстованность изучена относительно слабо. Основным источником данных являются колонки и разрезы архивных карстологических, геологических, гидрогеологических, реже инженерно-геологических, скважин.

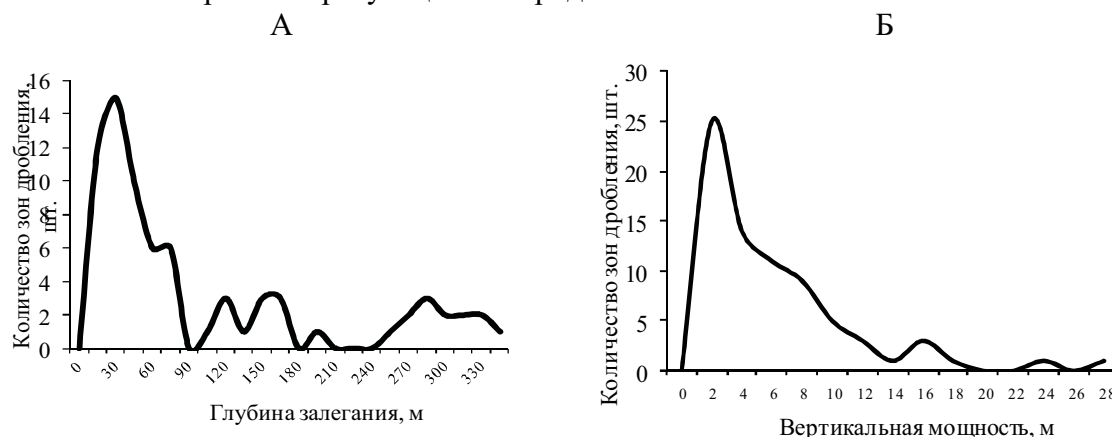
Обнаружение карстовых полостей и трещинных каналов размером 2–3 м, при глубине залегания кровли карстующихся пород

10 м и более, становится маловероятным даже с применением современных высокоточных геофизических методов. При бурении вскрытие полостей с вышеотмеченными размерами скорее случайность, нежели закономерность.

Отличительной чертой карбонатного карста является широкое развитие зон дробления, которые служат путями фильтрации подземных вод, растворяющих карстующиеся породы. Следовательно, на участках локализации зон дробления наиболее вероятно заложение карстовых полостей, которые при определенных условиях транслируются в вышележащие горизонты вплоть до выхода на дневную поверхность с образованием отрицательных форм рельефа.

Всего по данным архивных колонок карстологических скважин на исследуемой территории зафиксированы 1 незаполненная карстовая полость и 72 зоны дробления, большая часть которых встречена до глубины 60 м (рис. 6, А). Вертикальная мощность зон дробления в среднем колеблется от 0 до 2–4 м, в единичных скважинах регистрируются зоны дробления мощностью до 20–30 м (рис. 6, Б).

Из рис. 7 видно, что практически все зоны дробления приурочены либо к участкам повышенной плотности развития поверхностных карстовых форм, либо к периферийным частям таких участков. Данное обстоятельство полностью согласуется с теоретическими предпосылками распространения закарстованности, согласно которым поверхностное отражение карстовых деформаций в рельефе местности является прямым следствием развитой подземной закарстован-



**Рис. 6.** Кривые распределения зон дробления: А – по глубине залегания; Б – по вертикальной мощности



ности. В связи с чем при анализе карстовой опасности территории Калужской области были использованы поверхностные карстопроявления.

### Основные условия и факторы развития карста

На территории Калужской области наиболее широко развит карбонатный тип карста вследствие повсеместного распространения карбонатных пород девонской и каменноугольной систем, представленных

главным образом известняками, реже – доломитами. На юго-западе области карстовому процессу подвержены также толщи мела туронского времени.

В процесс растворения могут быть вовлечены среднерастворимые гипсы и ангидриды в виде прослоев и пропластков в карбонатах, а также сульфатно-карбонатный комплекс морсовского горизонта и мощная озерско-хованская гипсоносная толща (Петров, 2003).

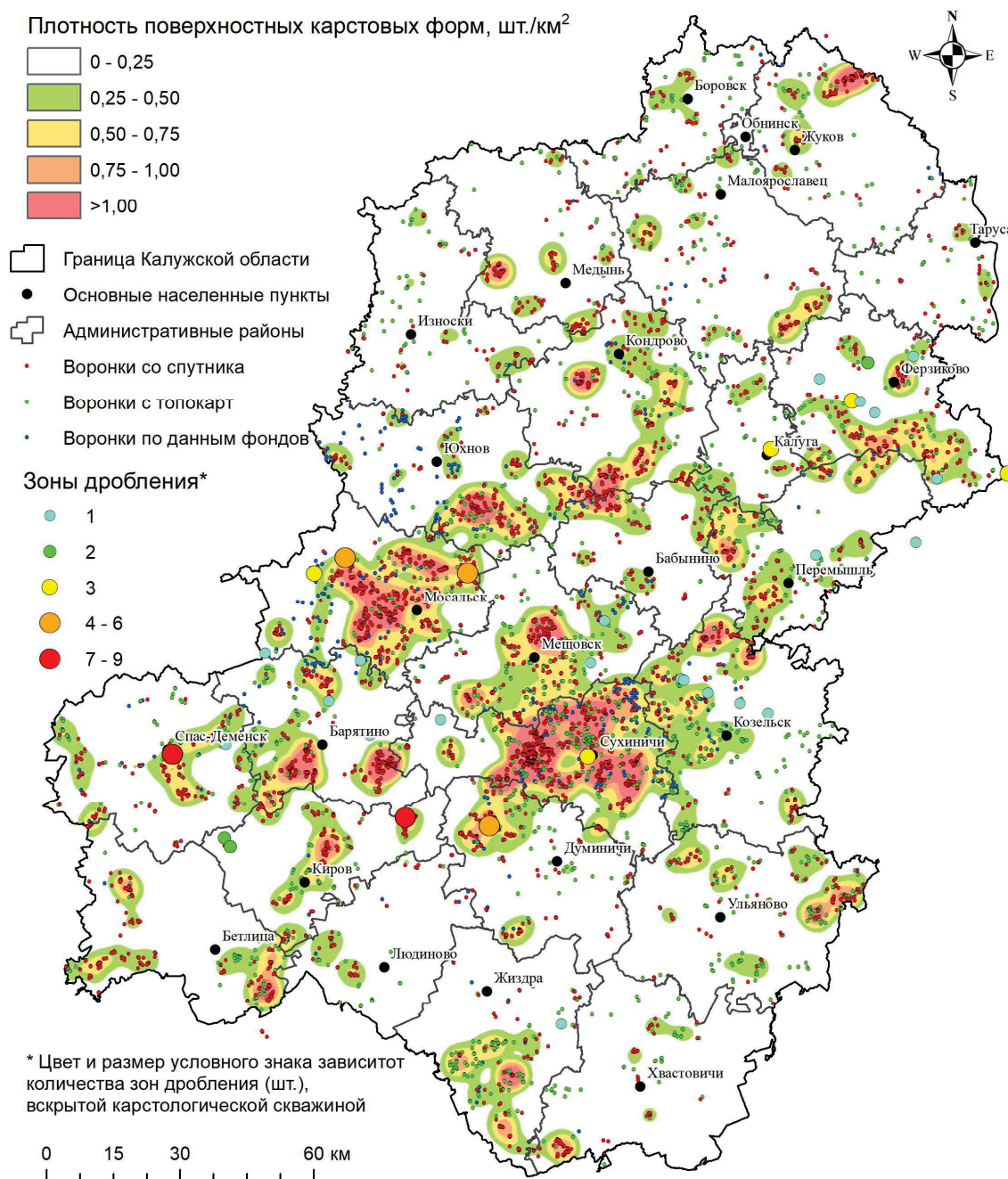


Рис. 7. Закарстованность территории Калужской области

Развитие карстового процесса в массиве горных пород определяется обязательными условиями. На активность и ход протекания карстового процесса влияет комплекс факторов, отражающих природные особенности строения карстового массива.

При исследовании карстоопасности территории Калужской области были рассмотрены и проанализированы 17 факторов природного строения, разделенных на 4 группы: структурно-тектоническую, геологическую, гидрогеологическую, геоморфологическую (таблица). Для удобства анализа в работе использованы факторы, имеющие количественную форму выражения, установленные по большому объему данных, полученных с картографических материалов различной направленности и из фондовых материалов геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических съемок прошлых лет (Кивилева, Бажутин, Щербаков, 2019; Щербаков, Кашин, 2019).

Показатели геологической и гидрогеологической групп широко применяются в практике карстологических исследований и рекомендуются для оценки карстовой опасности рядом нормативных документов (ТСН 302-50-95; Инструкция по проектированию..., 1984). В геологической группе наиболее часто встречаются показатели глубины залегания карстующихся пород и мощности водопорной толщи юрских глин. Среди гидрогеологической группы практически во всех нормативных документах рассматривается комплексный показатель – вертикальный градиент фильтрации. Данный фактор включает в себя пьезометрические уровни грунтовых и карстовых вод, а также упомянутую выше мощность водопорной толщи.

Факторы геоморфологической группы (удаленность от речной сети и превышение среднего уровня водотоков) позволяют оценить в количественной форме показатели, традиционно выделяемые при оценке карста в качественной форме (пойма, уступ, водораздел). Факторы структурно-тектонической группы (плотность тектонических нарушений и удаленность от них) напрямую связаны с трещиноватостью (водопроницаемостью) карстового массива.

Для каждого фактора установлены вид теоретического закона распределения карстовых форм, а также среднее значение и среднеквадратическое отклонение (таблица), определенные с применением стандартных формул математической статистики.

### **Результаты оценки карстоопасности и их обсуждение**

Как отмечено выше, для оценки карстовой опасности Калужской области использовано 17 факторов, отражающих особенности строения карстового массива. Для каждого из них установлены закон распределения и категории карстовой опасности в балльной форме по интервалам значений факторов. Участки, в пределах которых значения исследуемого фактора характеризуются как практически неопасные, кодируются баллом 1, участки с потенциальной карстовой опасностью – баллом 2 и соответственно участки опасные – баллом 3.

Ввиду отсутствия универсального математического механизма определения влияния каждого конкретного фактора на интенсивность развития карста весовые коэффициенты при построении интегральной модели карстоопасности были назначены экспертным способом.

Итоговая интегральная модель карстоопасности территории Калужской области построена с применением программного комплекса ESRI ArcGIS 10. Все построения выполнены в *два этапа*.

На *первом этапе* построены промежуточные растровые интегральные модели карстоопасности отдельно для каждой из 4 групп факторов (структурно-тектонической, геологической, гидрогеологической и геоморфологической). При построении промежуточных моделей веса всех факторов принимались равнозначными.

На территории области по структурно-тектоническим факторам преобладают участки, относящиеся к опасным (51%) и потенциально опасным (35%) категориям, а на долю практически неопасных территорий приходится 14% площади области (рис. 8, А).

Параметры теоретических законов распределения карстовых форм для рассматриваемых факторов, характеризующих условия развития карста

№ п/п	Факторы развития карста	Параметры теоретического распределения		Закон распределе- ния
		среднее	среднеквадрати- ческое отклонение	
1. Структурно-тектонические факторы				
1	Удаленность от линеаментов, м	4524,36	5706,85	Логарифмически нормальный
2	Удаленность от региональных разломов и кольцевых структур, м	1339,85	1360,00	Логарифмически нормальный
3	Линейная плотность региональных раз- ломов и кольцевых структур, км/км <sup>2</sup>	0,35	0,19	Нормальный
2. Геологические факторы				
4	Мощность отложений покровной толщи (глубина залегания кровли карстующих- ся отложений), м	33,28	22,63	Логарифмически нормальный
5	Мощность четвертичных отложений, м	19,17	12,01	Логарифмически нормальный
6	Мощность неоген-четвертичных отло- жений, м	18,53	14,96	Логарифмически нормальный
7	Мощность юрско-меловых глинистых отложений, м	2.14	2.69	Логарифмически нормальный
3. Гидрогеологические факторы				
8	Глубина установления грунтовых вод, м	8,58	7,39	Логарифмически нормальный
9	Глубина установления трещинно- пластовых вод, м	25,33	13,99	Нормальный
10	Высота напора трещино-пластовых вод, м	33,88	31,78	Логарифмически нормальный
11	Минерализация грунтовых вод, г/дм <sup>3</sup>	0,56	0,22	Нормальный
12	Минерализация трещинно-пластовых вод, г/дм <sup>3</sup>	0,62	1,36	Логарифмически Нормальный
4. Геоморфологические факторы				
13	Превышение над средним уровнем рек, м	96,10	28,18	Нормальный
14	Удаленность от речной сети, м	1235,29	1041,56	Логарифмически нормальный
15	Удаленность от основных палеодельто- вых и палеорусловых потоков, м	1923,72	2611,79	Экспоненциаль- ный*
16	Коэффициент горизонтальной расчле- ненности рельефа	0,16	0,05	Нормальный
17	Степень вертикальной расчлененности рельефа	82,32	19,09	Нормальный

\* Статистический параметр экспоненциального закона распределения  $\lambda = 0,00026$ .

Согласно факторам геологической груп-  
пы, наиболее распространены по площади  
участки, классифицированные как опасные  
(78%). Потенциально опасные и практически  
неопасные участки занимают соответственно  
10 и 12% площади области (рис. 8, Б).

По факторам гидрогеологической группы  
наиболее широко представлены участки, от-

несенные к опасной категории, – на их долю  
приходится 62% площади области. Потенци-  
ально опасные участки занимают 33% пло-  
щади. На практически неопасные участки  
приходится всего 5% общей площади Ка-  
лужской области (рис. 8, В).

В геоморфологическом отношении пло-  
щади, занятые различными карстоопасными



участками, распределились следующим образом: опасная категория – 13%, потенциально опасная – 59%, практически неопасная – 28% (рис. 8, Г).

На втором этапе получена итоговая интегральная модель карстоопасности Калужской области путем суммирования промежуточных моделей, построенных для каждой из

4 вышерассмотренных групп факторов (рис. 9). При расчете итоговой модели использовались следующие весовые коэффициенты для отдельных групп факторов: структурно-тектонические – 0,2; геологические – 0,3; гидрогеологические – 0,2; геоморфологические – 0,3.



**Рис. 8.** Промежуточные карты карстоопасности Калужской области, построенные по факторам: А – структурно-тектонической группы; Б – геологической; В – гидрогеологической; Г – геоморфологической



# Категории карстовой опасности

- практически неопасная
- потенциально опасная
- опасная

Граница Калужской области

Административные районы

Основные населенные пункты

Железная дорога

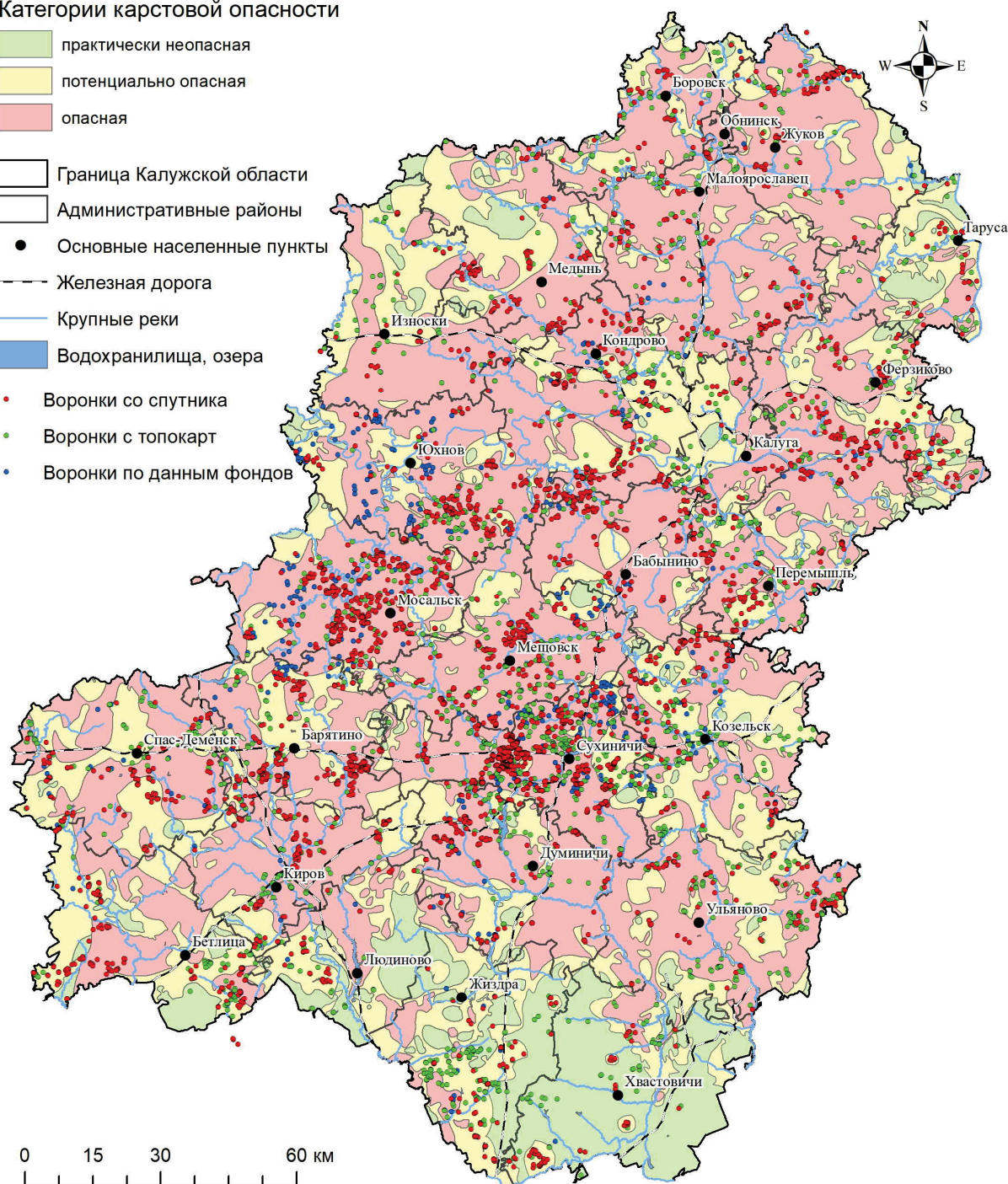
Крупные реки

Водохранилища, озера

Воронки со спутника

Воронки с топокарт

Воронки по данным фондов



**Рис. 9.** Карта карстоопасности Калужской области

Значения весовых коэффициентов принимались исходя из влияния той или иной группы факторов на развитие карстового процесса, объема и надежности имеющихся данных. Так, например, геологической группе факторов присвоен коэффициент 0,3 ввиду достаточного количества и равномерного распространения по территории скважин с информацией о геологическом разрезе. Гид-

рогеологической группе факторов присвоено значение весового коэффициента 0,2, что связано с недостаточным количеством химических анализов подземных вод и отсутствием систематических замеров установления их уровней по сезонам года.

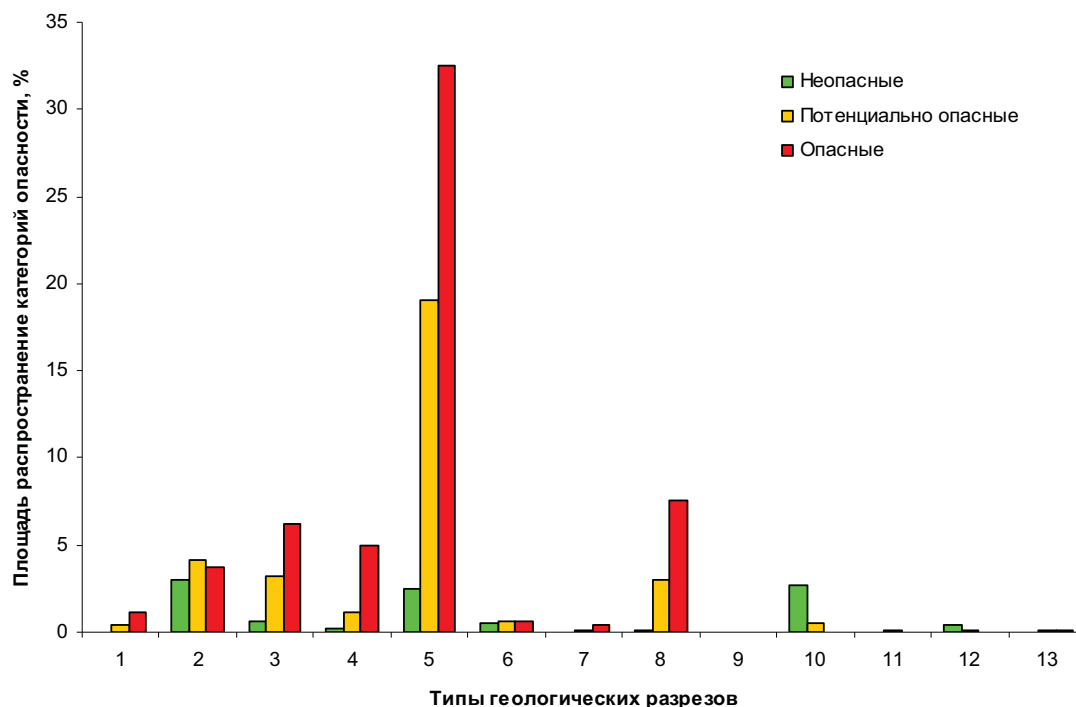
Согласно полученной итоговой карте карстоопасности территории Калужской области опасная категория занимает

57,2% площади, преимущественно локализуясь в центральной и северо-восточной части. Потенциально опасной и практически неопасной категориями занято 32,7 и 10,1% территории соответственно. Практически неопасная категория преимущественно выделяется в пределах границ Хвастовичского, Жиздринского и Людиновского районов. На всей остальной территории области потенциально опасная и практически неопасная категории имеют островное распространение.

Преобладающее большинство поверхностных карстовых форм (71%) группируется в пределах опасной категории, 27% карстопроявлений попадают в пределы границ

потенциально опасной категории и лишь 2% карстовых форм приходится на участки с практически неопасной категорией.

Следует отметить, что выделенные категории карстоопасности хорошо коррелируются с типами геологического разреза, характерными для территории Калужской области. Так, наиболее опасные участки тяготеют к площадям, для которых характерно залегание четвертичных рыхлых грунтов (преимущественно песков, супесей, суглинков, глин) непосредственно на каменноугольных отложениях при отсутствии или фрагментарном развитии юрско-мелового водоупорного глинистого слоя малой мощности (до 1–2 м, рис. 10).



**Рис. 10.** Процентное соответствие типов геологических разрезов категориям карстоопасности

## Выводы

1. Вся исследуемая территории Калужской области характеризуется развитием преимущественно карбонатного карста при подчиненном развитии сульфатно-карбонатного. Основными карстующимися породами являются известняки и доломиты. Широкое развитие на территории области имеют поверхностные (воронки, понижения) и подземные (зоны дробления) карстовые формы.

2. Методика оценки карстоопасности основывается на интегральном учете частных

оценок, установленных по отдельным факторам, оказывающим влияние на развитие карстового процесса и распространение карстовых форм. Основой методики стали анализ распределений карстовых форм по факторам природного строения исследуемой территории и их интегральный учет с применением балльного принципа.

3. При оценке карстоопасности использовано 17 различных природных факторов, разделенных на 4 группы: структурно-тектоническую, геологическую, гидрогеологическую и геоморфологическую. Для каж-

дого фактора установлены особенности распределения карстовых форм, подобраны наиболее вероятные теоретические законы, описывающие наблюдаемые распределения. С применением программного комплекса ESRI ArcGIS 10 построены 4 промежуточных модели и одна итоговая модель карстоопасности территории Калужской области.

4. По результатам районирования территории Калужской области по карстоопасности с применением интегрального метода выделены 3 категории различной степени опасности: опасная, потенциально опасная и практически неопасная. Опасная категория занимает 57,2% территории Калужской области, локализуясь преимущественно в центральной и северо-восточной части. Потенциально опасной и практически неопасной категориями занято 32,7% и 10,1% территории области соответственно. Практически неопасная категория преимущественно выделяется в пределах границ Хвастовичского, Жиздринского и Людиновского районов. На всей остальной территории области потенциально опасная и практически неопасная категории имеют островное распространение.

#### Библиографический список

Бобров С.П. Тектоника и минерагения Калужской области и прилегающих к ней территорий / Министерство природных ресурсов Калужской области, ООО ПП «Притяжение». Калуга: ИД «Эйдос», 2006. 336 с.

Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н. Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск: Изд-во РАН, 1992. 143 с.

Кивилева З.В., Бажутин П.И., Щербаков С.В. Влияние мощности перекрывающей толщи на интенсивность развития карста (на примере Мосальского района Калужской области) // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. науч.-практ. конф. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2019. С. 308 – 312.

Петров В.Г. Геологическое строение и полезные ископаемые Калужской области. Калуга: ИД «Эйдос», 2003. 440 с.

Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / ПНИИС. М., 1995. 167 с.

Соколова И.А. Оценка карстовой опасности в заречной части Нижнего Новгорода с применением ГИС-технологий: автореф. ... канд. геол.-мин. наук. Нижний Новгород: ООО «М-Принт», 2010. 26 с.

СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / ПНИИС. М., 2001. 101 с.

СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / Минрегион России. М., 2012.

ТСН 11-301-2004 По. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях Пермской области / Администрация. Пермь, 2004. 122 с.

Физическая география и природа Калужской области. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. 272 с.

Хоменко В.П., Толмачев В.В. О механизме карстовых разрушений // Строительство на закарстованных территориях. М., 1983. С. 3 – 15.

Щербаков С.В., Катаев В.Н. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естественные науки. 2011. Т. 153, кн. 1. С. 203–224.

Щербаков С.В. Показатели-факторы развития карста при комплексной оценке карстоопасности территорий // Гидрогеология и карстование / Перм. гос. ун-т, 2013. Вып. 19. С. 261 – 268.

Щербаков С.В. Расчет весовых коэффициентов интегральной математической модели при инженерно-карстологических исследованиях // Инновации в современной геологической науке и практике: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Старооскольский филиал ФГБОУ ВПО МГРИ-РГГРУ. 2014. С. 406–411.

Щербаков С.В., Кашин М.К. Взаимосвязь между распространением карстовых форм и глубиной установления грунтовых и трещинно-пластовых вод на территории Калужской области // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: матер. регион. науч.-практ. конф. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2019. С. 312–318.



# Zoning the Karstified Territories of the Kaluga Region Using an Integrated Approach to Identify Favorable Areas for Construction

S.V. Shcherbakov, Z.V. Kivileva

Perm State University

4 Genkelya Str., Perm 614990, Russia. E-mail: shcherbakov.lpmg@mail.ru, zoya.kivileva@mail.ru

The article considers 17 factors of natural structure of the territory of the Kaluga region divided into 4 groups: geological, hydrogeological, structural-tectonic and geomorphological. The relationship between each factor and the development of surface karst forms has been analyzed. Laws of distribution of karst forms and factors boundary values corresponding to intervals with different degree of danger are defined. The final assessment of the karst hazard was carried out by means of ESRI ArcGIS 10 using an integrated approach that takes into account the role of each factor in the development of the karst process as much as possible.

Key words: *karst forms; karst hazard; conditions of karst development; natural structure factors; integrated technique; danger category.*

## References

- Bobrov S.P.* 2006. Tektonika i minerageniya Kaluzhskoy oblasti i prilgayushchikh k nej territoriy [Tectonic and mineralgeny of Kaluga region and surrounding territories]. Ejdos, Kaluga, p. 336. (in Russian)
- Dublyanskaya G.N., Dublyansky V.N.* 1992. Kartografirovanie, rayonirovanie i inzhenerno-geologicheskaya otsenka zakarstovannykh territoriy [Mapping, zoning and engineering-geological assessment of karst territories]. RAN, Novosibirsk, p. 143. (in Russian)
- Kivileva Z.V., Bazhutin P.I.* 2019. Vliyanie moshchnosti perekryvayushchey tolshchi na intensivnost razvitiya karsta (na primere Mosalskogo rayona Kaluzhskoy oblasti) [Influence of the thickness of overlying strata on the intensity of karst development]. In: Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala. Perm, pp. 308-312. (in Russian)
- Petrov V.G.* 2003. Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Kaluzhskoy oblasti [Geological structure and mineralization of Kaluga region]. Ejdos, Kaluga, p. 440. (in Russian)
- Rukovodstvo po ingenerno-geologicheskim izyskaniyam v rayonakh rasvitiya karsta* [Guidance on site characterization in the areas of karst development]. PNIIS, Moskva, 1995, p. 167. (in Russian)
- Sokolova I.A.* 2010. Otsenka karstovoy opasnosti v zarechnoy chasti Nizhnego Novgoroda s primeneniym GIS-tekhnologiy. [Assessment of karst hazard in the district of Nizhny Novgorod using GIS technology] Diss. kand. geol.-min. nauk. M-Print, Nizhniy Novgorod, p. 26. (in Russian)
- SP 11-105-97.* Inzhenerno-geologicheskkiye izyskaniya dlya stroitelstva. CH. II. Pravila proizvodstva rabot v rayonakh razvitiya opasnykh geologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh protsessov [SP 11-105-97. Engineering and geological surveys for construction. Part II. Rules for conducting the work in areas of development of dangerous geological and engineering-geological processes]. PNIIS, Moskva, p. 101. (in Russian)
- SP 116.13330.2012.* Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh protsessov. Osnovnyye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 22-02-2003 [SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. The main provisions. Updated edition of SNIIP 22-02-2003]. Minregion Rossii. Moskva. 2012. (in Russian)
- TSN 11-301-2004 Po.* Inzhenerno-geologicheskkiye izyskaniya dlya stroitelstva na zakarstovannykh territoriyakh Permskoy oblasti [TSN 11-301-2004 By. Geological engineering surveys for construction in the karst territories of the Perm region]. Administratsiya, Perm, 2004, p. 122. (in Russian)
- Fizicheskaya geografiya i priroda Kaluzhskoy oblasti* [Physical geography and nature of the Kaluga region]. Izd. N. Bochkarevoy, Kaluga, 2003, p. 272. (in Russian)
- Khomenko V.P., Tolmachev V.V.* 1983. O mekhanizme karstovyykh razrusheniy [On the mechanism of karst destruction]. In: Stroitelstvo na zakarstovannykh territoriyakh. Moskva, pp. 3-15. (in Russian)
- Shcherbakov S.V., Katayev V.N.* 2011. Integralnaya otsenka karstoopasnosti urbanizirovannykh territoriy (na primere g. Kungur) [Integral assessment of karst hazard of urbanized territories (on the example of Kungur)]. Uchenye zapiski Kazanskogo univ. Seriya Yestestvennyye nauki. 153(1):203-224. (in Russian)



*Shcherbakov S.V.* 2013. Pokazateli-factory razvitiya karsta pri kompleksnoy otsenke karstoopasnosti territoriy [Indicators-factors of karst development in the integrated assessment of karst hazard of territories]. *Gidrogeologiya i karstovedeniye*. 19:261-268. (in Russian)

*Shcherbakov S.V.* 2014. Raschet vesovykh koefitsientov integralnoy matematicheskoy modeli pri inzhenerno-karstologicheskikh issledovaniyakh [Calculation of the weight coefficients of the integral mathematical model in engineering-karstological research]. *In: Innovatsii v sovremennoy geolog-*

*icheskoй науке i praktike*, Starooskolskiy filial FGBOU VPO MGRI-RGGRU), pp. 406-411. (in Russian)

*Shcherbakov S.V., Kashin M.K.* 2019. Vzaïmosvyaz mezhdu rasprostraneniym karstovykh form i glubinoй ustanovleniya gruntovykh i treshchinno-plastovykh vod na territorii Kaluzhskoy oblasti [The relationship between the distribution of karst forms and the depth of ground- and fracture-stratified water in the Kaluga region]. *In: Geologiya i poleznyye iskopayemyye Zapadnogo Urala*. PGU, Perm, pp. 312-318. (in Russian)