УДК 911.9:551.435.627

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ГЕОСИСТЕМНОГО ПОДХОДА**Ямашкин А.А., Ямашкин С.А., Зарубин О.А., Мучкаева Н.С., Юнкман Е.С.***ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: yamashkin56@mail.ru*

Статья посвящена решению научной задачи оценки устойчивости геосистем и прогнозирования экзогеодинамических процессов. Прогнозирование оползневых процессов выполняется на основе предположения о том, что будущие природно-техногенные чрезвычайные ситуации с высокой вероятностью могут произойти в тех же условиях, в которых они проявлялись в прошлом. Раскрываемый в статье алгоритм прогнозирования возникновения оползневых процессов проводится в четыре основных этапа: сбор и подготовка данных, систематизация данных, построение пространственных моделей, оценка результатов. Экспериментальные исследования с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) проведены на базе тестового научно-исследовательского полигона «Мордовия», который включает краевые части лесостепных геосистем Приволжской возвышенности в лесной провинции пластовой Окско-Донской низменности. Характеристика индикаторов и анализ интенсивности проявления процессов оползнеобразования приводятся на основе иерархического структурирования геосистем на уровнях класса (подкласса), группы, типа и рода геосистем. В работе показано, что сопряженный анализ карт ландшафтных метрик и ландшафтных рисунков позволяет оптимизировать оперативную диагностику развития экзогеодинамических процессов, а автоматизацию данного процесса целесообразно проводить посредством формирования ансамблей классификаторов, путем последовательного решения задач: формирование набора моноклассификаторов, определение алгоритма метаклассификатора, обучение моно- и метаклассификаторов, оценка эффективности ансамбля и его отдельных мономodelей. Применение ансамблей позволяет оперативно анализировать геосистемы с целью анализа развития природных и природно-техногенных процессов и явлений. Апробация ансамблей на ряде научно-исследовательских полигонов показала точность выделения территорий с оползневыми процессами более 85 %.

Ключевые слова: обучение ансамблей, машинное обучение, геосистемы, оползни, пространственно-временное прогнозирование

**SPATIAL-TEMPORAL PREDICTION OF LANDSLIDE PROCESSES
BASED ON THE GEOSYSTEM APPROACH****Yamashkin A.A., Yamashkin S.A., Zarubin O.A., Muchkaeva N.S., Yunkman E.S.***Mordovian National Research Ogarev University, Saransk, e-mail: yamashkin56@mail.ru*

The article is devoted to solving the scientific problem of assessing the stability of the geological environment and forecasting exogeodynamic processes is determined by the increasing number of occurrence of complex natural and technological emergencies. The prediction of landslide processes is based on the assumption that future natural-technological emergencies are highly likely to occur under the same conditions in which they occurred in the past. The algorithm for predicting the occurrence of landslide processes disclosed in the article is carried out in four main stages: collecting and preparing data, systematizing data, building spatial models, and evaluating results. Experimental studies using Earth remote sensing data (ERS) were carried out on the basis of the Mordovia test polygon, which includes the marginal parts of forest-steppe geosystems of the Volga Upland in the forest province of the Oksko-Don lowland. The characteristics of indicators and the analysis of the intensity of the manifestation of landslide formation processes are given on the basis of hierarchical structuring of geosystems at the level of a class (subclass), group, type and kind of geosystems. It is shown in the work that a coupled analysis of landscape metric maps and landscape drawings can optimize the operational diagnostics of the development of exogeodynamic processes, and it is advisable to automate this process by forming ensembles of classifiers, by successively solving problems: forming a set of monoclifiers, defining a metaclassifier algorithm, training mono- and meta classifiers, evaluation of the effectiveness of the ensemble and its individual monomodels. The use of ensembles allows you to quickly analyze geosystems in order to analyze the development of natural processes and phenomena. Testing of ensembles at a number of research polygons showed the accuracy of the allocation of territories with landslide processes of more than 85 %.

Keywords: ensemble training, machine learning, geosystems, landslides, spatio-temporal prediction

Актуальность оценки устойчивости геологической среды и прогнозирования экзогеодинамических процессов (ЭГП) определяется возрастающим числом возникновения сложных природно-техногенных чрезвычайных ситуаций. Решение задачи по минимизации последствий эколого-социально-экономических проблем

может быть достигнуто путем внедрения в науку и практику региональных географических информационных систем (ГИС), обеспечивающих сбор, обработку, систематизацию, прогнозирование и своевременное представление данных о состоянии геотехнических систем для принятия конкретных управленческих решений.

Такая постановка проблемы предполагает решение следующих задач: 1) разработка методики ГИС-картографирования условий возникновения и развития процессов; 2) разработка алгоритмов геоинформационного анализа и синтеза данных по объектно-структурному строению литогенной основы геосистем; 3) выявление пространственно-временных закономерностей проявления процессов; 4) обоснование схемы геоэкологического зонирования региона по вероятности возникновения чрезвычайных природно-техногенных ситуаций.

Прогнозирование ЭГП выполняется на основе предположения о том, что будущие природно-техногенные чрезвычайные ситуации с высокой вероятностью могут произойти в тех же условиях, в которых они проявлялись в прошлом. Поэтому важную роль играют оценка пространственной взаимосвязи между факторами различной природы и предыдущие эпизоды возникновения.

Материалы и методы исследования

В последние десятилетия исследователи разработали множество методов создания прогнозных карт регионов. Эти подходы основаны на использовании искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, деревьев принятия решений, логистической регрессии, машин опорных векторов [1–3]. Их эффективность можно улучшить, используя методы создания систем ансамблей блоков машинного обучения для классификации [4].

Анализ геосистем на основе систем глубокого машинного обучения применяется в решении практических задач: прогнозирования чрезвычайных процессов и явлений, мониторинга окружающей среды. Применение

машинного обучения позволяет снизить стоимость исследований благодаря точной экстраполяции измерений. Обучение ансамблей предполагает использование объединенных алгоритмов машинного анализа.

Алгоритм прогнозирования возникновения ЭГП может быть проведен с использованием ансамблей в четыре основных этапа: 1) сбор и подготовка данных; 2) систематизация данных; 3) построение пространственных моделей; 4) оценка результатов моделирования (рис. 1).

Процесс *сбора и подготовки данных* должен опираться на данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также документальные материалы цифровых инфраструктур пространственных данных (ИПД) [5]. К факторам, отражающим развитие ЭГП, следует отнести морфометрические (уклон, высота, кривизна профиля) и морфологические характеристики рельефа, тектонику, геологию и гидрогеологию, климат и гидрологический режим поверхностных вод, тип почвенного и растительного покрова, землепользование, геотехнические системы и плотность этих объектов. После ревизии исходная информация должна быть подготовлена для формирования нормализованных наборов данных, пригодных для обучения и тестирования алгоритмов машинного обучения, построения и проверки моделей.

Систематизация данных. Учитывая многофакторность происхождения ЭГП, их индикация решается путем разработки синтетической карты геосистем. Результаты проектирования ГИС «Мордовия» показали, что в исследовании закономерностей развития ЭГП перспективно использование таксонов геосистем, предложенных В.А. Николаевым [6], – система, класс, группа, тип, род и вид геосистем (таблица).

Таксоны геосистем

Таксон	Геосистемные процессы, индикаторы экзогеодинамических процессов
Система	макроклимат (арктические, субарктические, бореальные и др.); определяют особенности развития геоэкологических процессов: выветривание, экзогеодинамика геолого-геоморфологических процессов, гидрогеодинамика и гидрогеохимия подземных вод, гидрологические, почвообразовательные процессы, биологический круговорот, вероятность проявления климатогенных чрезвычайных ситуаций
Класс	тектоника и отличающиеся по возрасту и динамике развития макроформы формы рельефа, определяющие типы и интенсивность развития экзогеодинамических процессов
Группа	тип водного и водно-геохимического режима
Тип	развитие почвообразовательных и биологических процессов, распространение типов почв и классов растительных формаций
Род	морфоскульптурные формы рельефа и развитие экзогеодинамических процессов (эрозионных, карстовых, суффозионных, оползневых и т.д.)
Вид	факторально-динамическая структура местопроизрастаний и растительности на топологическом уровне

Рис. 1. Алгоритм прогнозирования возникновения экзогеодинамических процессов

Иерархическое структурирование и анализ геосистем ориентированы на выделение литогидрогенных геосистем – генетически однородных, территориально-смежных образований, обособливающих под действием определенного режима поверхностных и подземных водных потоков, обуславливающих развитие определенного спектра экзогеодинамических, почвообразовательных и биогенных процессов. Диагностика литогидрогенных геосистем основывается на системном анализе грунтовых и межпластовых вод междуречных пространств, с учетом комплекса дешифровочных признаков стратиграфо-генетических водопроводящих горизонтов и их частей, ло-

кализации водопроявлений, элементов гидрографической сети разных порядков. Структура литогидрогенных систем формирует пространственные взаиморасположения и взаимосвязи потоков подземных вод – областей питания, транзита и разгрузки.

Построение пространственных моделей целесообразно осуществлять ансамблевыми методами с целью оптимизации входных данных с последующей классификацией территории с использованием алгоритмов машинного обучения. Моделирование ЭГП основывается на построении ансамблевых систем машинного обучения, предполагающих объединение нескольких классификаторов в систему для повышения точности

проводимой классификации земель на основе материалов космической съемки. Базовыми структурными элементами ансамбля классификаторов являются набор отдельных моноклассификаторов (глубоких нейросетевых моделей различной архитектуры и глубины, деревьев принятия решений, линейных классификаторов) и метаклассификатор – системный модуль, принимающий на вход данные моноклассификаторов для принятия конечного решения о принадлежности анализируемой территории конкретному классу. Результаты обучения моделей были использованы для разработки карт вероятности проявления природно-техногенных чрезвычайных ситуаций.

Оценка результатов моделирования проведена на системе тестовых данных посредством расчета матриц ошибок и метрик эффективности и ошибочности. На этом этапе проверяются и важнейшее свойство обучаемого ансамбля – способность к обобщению, и качество анализа на новых данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Полигон «Мордовия» расположен в суббореальных семигумидных (лесостепных) геосистемах пластово-ярусной Приволжской возвышенности. Лесостепные геосистемы контрастно переходят в лесную провинцию водно-ледниковых равнин пластовой Окско-Донской низменности.

В качестве основных источников информации использовались многозональные космические снимки и крупномасштабные топографические карты. Пространственная база данных оползневых процессов включила характеристики 1370 оползней. Каждому оползню в атрибутивной таблице присваивалось значение ширины, длины, глубины, экспозиции и абсолютной отметки. База данных по водопрооявлениям включила информацию по 3 315 истокам, 2 808 родникам, 865 мочажинам.

Систематизация данных для установления пространственных закономерностей проявления процессов проводилась с использованием цифровой модели рельефа, синтетической карты геосистем и тематических карт природных компонентов.

С целью создания систем ансамблей блоков машинного обучения для классификации проведена типология оползневых геосистем. По совокупности признаков выделены: оползни-блоки, оползни-оплывины, оползни-срывы, вязкопластические оползни, оползни сдвига-течения, оползни

сдвига. Среди морфологических признаков их диагностики особую ценность представляет географическое соседство, формирующее ландшафтный рисунок [7]. Кроме природных факторов, на его формирование оказывает влияние тип хозяйственного освоения территории.

Выделение *классов геосистем* основывается на картографировании морфоструктур с учетом выделения форм рельефа, сформированных при ведущей роли эндогенных процессов. Задача выделения морфоструктур сводится к ландшафтной индикации тектонических структур, геолого-литологического строения, рельефа, гидрографической сети и т.д. Результаты картографирования показали, что наименее подвержены оползнеобразованию возвышенные (выше 245 м) останцово-водораздельные массивы осевой части Приволжской возвышенности, где оползни встречаются единично. Преобладающая часть оползневых геосистем располагается в высотном интервале от 120 до 250 м, с максимальной концентрацией на абсолютных отметках 141–210 м. Следует обратить внимание на то, что аналогичную закономерность имеет распространение родников. Возвышенные участки (более 250 м) отличаются малым родниковым стоком (рис. 2).

Из морфоструктурных элементов на многозональных космических снимках наиболее отчетливо выделяются линеаменты. В геодиагностике развития ЭГП они рассматриваются как зоны с повышенной трещиноватостью горных пород, коллекторы движения подземных вод. Для выявления закономерностей природной дифференциации по результатам дешифрирования линеаментов проектируется карта их густоты с последующим сопоставлением со структурно-тектонической картой, составляемой на основе интерпретации геофизических данных.

На исследуемом полигоне значительная активность ЭГП характерна для областей преобладания ортогональных систем линеаментов (рис. 3). Преобладание коротких штрихов на космическом снимке может свидетельствовать о том, что данная область является потенциальной для активного развития процессов. Важно отметить общие закономерности распространения оползневых процессов – приуроченность к склонам юго-западных, южных и юго-восточных экспозиций и коренным бортам долин рек, которые формируют зоны разгрузки межпластовых вод.

Рис. 2. Общие закономерности развития оползневых процессов

Рис. 3. Линеаменты на карте оползневых процессов

Группы геосистем отражают элементы зон фильтрации подземных вод – областей питания, транзита и разгрузки. В структуре природной дифференциации это находит выражение в формировании геосистем с разной степенью увлажненности. Поэтому при выявлении закономерностей распространения групп геосистем (элювиальных, супе-

раквальных, аквальных) в первую очередь обращается внимание на характер изменения увлажненности. Оползневые процессы хорошо индицируются по ландшафтным рисункам, существующим в зонах выклинивания грунтовых вод на склонах, формирующих субгидроморфные и гидроморфные факторально-динамические ряды фаций.

На уровне *тип* геосистем основной акцент делается на анализе структуры контуров, отражающих генезис, эволюцию и современное состояние типов почв и растительных формаций. ГИС-моделирование ориентируется на поиск закономерностей взаимодействия зональных и аazonальных геосистем. Так, например, в северной лесостепи Приволжской возвышенности хорошо выражена склоновая смена лугово-степных и лесных геосистем [8]. Зона границы типов ландшафтов отличается наиболее активным развитием оползневых процессов.

Закономерности дифференциации ландшафтной оболочки на уровне *род* геосистем определяются морфоскульптурными формами рельефа и слагающими их отложениями. Функционирование геосистем на исследованном полигоне обуславливается субгоризонтальным залеганием карбонатных, терригенных и кремнисто-карбонатных коренных горных пород. Выделенная особенность определяет этажность разгрузки подземных вод. Конкретизация информатизации о литолого-генетическом строении и его влиянии на ЭГП проводится на топологическом уровне, с привлечением прямых, косвенных и комплексных дешифровочных признаков по сублитоморфным рядам геосистем.

Обособление родов геосистем в подклассе возвышенной эрозионно-денудационной равнины пластово-ярусной Приволжской возвышенности во многом определяется доминированием геосистем останцово-водораздельных массивов с абсолютными отметками до 334 м, образующих дугообразный водораздел Суры и Алатыря. С запада и северо-запада они ограничиваются уступом высотой до 60–80 м и крутизной 10–15°, местами до 40°. Водораздельные поверхности плоские и плоско-выпуклые, пересекаются корытообразными понижениями (седловинами), к которым протягиваются верховья временных водотоков. Выделяются следующие роды геосистем:

– кремнисто-карбонатных пород (опоки с линзами диатомитов и трепелов) палеогена; высокая трещиноватость горных пород и эрозионная расчлененность формируют однопластовую область фильтрации водных потоков открытого дренирования с ярко выраженным родниковым стоком и перетоком в нижележащий водоносный горизонт; единичные родники в верховьях ручьев и рек малобитные, плотность оползней в этой области наименьшая;

– карбонатных пород (мела и мергеля) верхнемелового возраста, перекрываемых на значительных пространствах породами палеогена и маломощными делювиальными суглинками; наличие водоупорных горизонтов в подошве обуславливает активную разгрузку вод; фильтрация водных потоков отражается в развитии суффозионно-карстовых процессов, а в краевых частях геосистем – оползневых и эрозионных;

– волнистые поверхности придолинных склонов, сложенные карбонатными и кремнисто-карбонатными породами с маломощным чехлом делювиальных суглинков – преобладают латеральные потоки вод из смежных водоносных горизонтов; дебиты родников – 1,0–2,5 л/с, для литогидрогенных систем характерна повышенная активность эрозионных и оползневых процессов.

В подклассе вторичных моренных равнин краевой части пластово-ярусной Приволжской возвышенности преобладают водоразделы высотой 230–250 м. Литогидрогенные системы формируются в терригенных песчано-глинистых породах мезо-кайнозойского возраста, в толще которых формируются серии водоносных горизонтов. Водообильность горизонтов слабая, удельный дебит – 0,005–0,25 л/с. Основные реки, пересекающие равнину, образуют среднерусский тип рисунка речной сети. Верховья рек имеют вид щелевидных крутопадающих балок и оврагов с высотой склонов до 10–16 м, на отдельных участках 25–30 м. Долины рек асимметричны, с крутыми склонами южной и пологими склонами северной экспозиции. Доминируют литогидрогенные системы:

– приводораздельные склоны, сильно изрезанные овражно-балочными системами; питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетока из других водоносных горизонтов; геосистемы отличаются значительным распространением оползневых форм, при значительном варьировании плотности и их размеров; наиболее типично проявление оползнеобразования и дефлюкции на фронтальных склонах, вдоль границы пород различного литологического состава, обуславливающих формирование источников мочежинного типа;

– волнистые поверхности придолинных склонов, сложенные делювиальными суглинками; питание осуществляется за счет подтока вод из смежных водоносных горизонтов, разгрузка гравитационных вод происходит посредством латерального оттока.

Роды геосистем в подклассе водно-ледниковых равнин пластовой Окско-Донской низменности, протягивающихся по центральной части бассейна реки Вад, правобережью Мокши и левобережьям Алатыря и Суры, определяются флювиогляциальными и древнеаллювиальными песками. Доминируют пологоволнистые сглаженные поверхности с всхолмленно-грядовыми дюнными морфоскульптурами. Основные водоразделы располагаются преимущественно на абсолютных высотах 180–220 м. Водораздельные склоны пологие, коренные борта долин изрезаны балками и оврагами. Доминирует однопластовая область фильтрации открытых потоков; подземные воды высачиваются в днищах водосборных воронок балок, в подрусовые потоки долин рек.

В литогидрогенных геосистемах долин крупных и средних рек разгрузка водоносных горизонтов осуществляется по коренным бортам и руслам рек. Долинные геосистемы отличаются наибольшей динамичностью развития ЭГП. Реки протекают в широких долинах с пологими террасированными склонами с выработанным продольным профилем равновесия. Исключение составляет участок долины р. Сивини при пересечении ею Сивиньской структуры, где в русле на земную поверхность выходят каменноугольные известняки. Оползни приурочены к коренным бортам долин, пересекающим их балкам и оврагам. Развиты преимущественно оползни типа оплывин с неровной бугристой поверхностью, с невысокими (до 1,5–2 м) стенками срыва. Возникают оползни-оплывины при значительной увлажненности пород в зонах выхода на дневную поверхность верхнеюрских и нижнемеловых отложений. По коренным бортам долин развиты блоковые оползни. Их поверхность имеет ступенчатое строение, с неровными, наклоненными вглубь склона площадками. Стенки срыва прямолинейны, обрывисты или слегка выположены. Высота их от 5–6 до 15 м.

Таким образом, подземные воды вымывают, выщелачивают, размягчают породы, создают дополнительные нагрузки. Фильтрация водных потоков от области питания к зонам разгрузки формирует характерный ландшафтный рисунок – отдельные крупные балки, террасовидные и циркуобразные формы рельефа, крупные трещины, стенки отрыва, валы выпирания, бугристость, застойные скопления воды, заболоченные участки, деформация дорог.

При оперативной диагностике оползневых процессов по космическим сним-

кам весьма эффективно использование ландшафтных метрик: индекс уникальности (I_o), индекс относительного богатства (I_r), индекс ландшафтной сложности (I_c), суммарный коэффициент расчлененности (K), энтропийная мера разнообразия (коэффициент Шеннона) (H) (рис. 4). Данный процесс включает выбор ландшафтных метрик и территориальных носителей информации, расчет, шкалирование (с выделением низкого, среднего, высокого и очень высокого уровней) и геоинформационное моделирование.

Сопряженный анализ ландшафтных метрик и проявлений процессов развития ЭГП показал, что наибольшая плотность расположения оползней характерна для зон с очень высокими значениями параметров I_o , I_r , I_c , K , H . Плотность расположения оползней здесь выше в среднем в 2,43 раза, чем в зонах с низким уровнем, в 1,77 раза, чем в зонах со средним уровнем, и в 1,67 раза, чем в зонах с высоким уровнем. Наибольшее превышение плотностных значений очень высокого уровня над низким характерно для индексов I_r , I_c (оба – в 2,85 раза) и K (в 2,20 раза).

Привлечение карт ландшафтных метрик к процедурам инструментального дешифрирования космических снимков позволяет оптимизировать оперативную диагностику развития ЭГП. Автоматизацию данного процесса и повышение его эффективности целесообразно проводить посредством формирования ансамбля классификаторов [9]. Общий алгоритм технологического процесса включает: формирование системы классификаторов, обучение моно- и метаклассификатора, оценка эффективности классификации ансамбля в целом и мономodelей в частности. Процесс обучения моноклассификаторов зависит от архитектуры и параметров модели классификации и проводится на основе набора данных, подготовленного с использованием системы тестовых полигонов.

Оценка эффективности классификаторов ансамбля основывается на метриках матриц ошибок, которые становятся исходными данными для настройки метаклассификатора. Принятие решения метаклассификатором целесообразно осуществлять методом взвешенного голосования, причем веса следует определить на основе рассчитанных метрик точности. На основе весовых коэффициентов формируется матрица эффективности ансамбля: строки соответствуют определяемым классам, а столбцы –

моноклассификаторам. Каждое значение элемента выстраиваемой матрицы равно эффективности классификатора в выявлении земель определенных свойств и категорий. Затем проводится оценка эффективности метаклассификатора и всего ансамбля для формирования представления о качестве предложенной модели детекции оползневых территорий.

С точки зрения временных затрат и требований к производительности аппаратного обеспечения предлагаемая методика формирования ансамблей показывает средний результат, в некоторых случаях опережая системы, реализованные на основе беггинга и бустинга, обучаясь и проводя классификацию земель за конечное предсказуемое время. Анализ характеристик эффективности моноклассификаторов и ансамбля в целом говорит о том, что точность решения, при-

нятого ансамблем, в большинстве случаев близка к эффективности самого точного классификатора ансамбля, при этом в некоторых случаях превышает ее.

Выводы

Синтетическое картографирование иерархической организации геосистем оптимизирует диагностику взаимодействий зональных и азональных факторов, установление закономерностей ландшафтной дифференциации и развитие ЭГП. В зоне взаимодействия лесостепных геосистем пластово-ярусной Приволжской возвышенности и лесных ландшафтов пластовой Окско-Донской низменности проявляются общие закономерности развития ЭГП. Наиболее активное развитие оползневых процессов наблюдается в зоне границы лугово-степных и лесных типов ландшафтов.

Рис. 4. Ландшафтные метрики на уровне род геосистем и плотность проявления процессов оползнеобразования

Ведущую роль в развитии ЭГП имеют литогидрогенные системы. Подземные воды вымывают, выщелачивают, размягчают породы, создают дополнительные нагрузки. Фильтрация водных потоков от области питания к зонам разгрузки формирует зоны накопления, транспортировки и разгрузки. Каждой зоне соответствуют характерный рисунок геосистем. Зоны наиболее активного развития ЭГП согласуются с распространением солифлюкционных, делювиально-солифлюкционных, делювиальных и гляциальных образований.

При оперативной диагностике состояния, динамики геосистем перспективно сочетание их синтетического картографирования с расчетами ландшафтных метрик: индекс уникальности, индекс относительного богатства, индекс ландшафтной сложности, суммарный коэффициент расчлененности, энтропийная мера разнообразия (коэффициент Шеннона). Построенная на основе ландшафтных метрик серия карт позволяет количественно диагностировать главные процессы функционирования геосистем: 1) влагооборот; 2) перенос минерального вещества и геохимический круговорот; 3) энергообмен. Участки с высокими значениями ландшафтных метрик сопряжены с ареалами активного развития ЭГП.

Наиболее устойчивыми к внешним воздействиям являются останцовые массивы, сложенные «бронированными» опоками и песчаниками палеогенового возраста, обеспечивающими сохранение крутых склонов. Развитие ЭГП сводится к формированию относительно малоактивных эрозионных форм. В геосистемах водоразделов, сложенных верхнемеловыми карбонатными породами, развиваются суффозионно-карстовые и эрозионные процессы. Наиболее активно ЭГП развиваются на нижних вогнутых участках склонов в зоне контакта лесных и лугово-степных геосистем. В водораздельных частях преобладают мелкие блоковые оползни, ниже по склону – оплывинные.

Применение ансамблей позволяет оперативно анализировать геосистемы с целью

анализа развития ЭГП. Анализ метрик эффективности моноклассификаторов и ансамбля показал, что точность решения, принятого ансамблем, как правило, находится на уровне наиболее точного классификатора. В некоторых случаях применение ансамбля классификаторов показывает лучший результат. Их апробация на ряде научно-исследовательских полигонов демонстрирует точность выделения территорий с оползневыми процессами более 85%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70055.

Список литературы / References

1. Pradhan B. An Assessment of the use of an advanced neural network model with five different training strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Journal of Data Science*. 2011. Vol. 9. P. 65–81. DOI: 10.6339/JDS.2011.09(1).658.
2. Wang Y., Wang X., Jian J. Remote Sensing Landslide Recognition Based on Convolutional Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. Vol. 1. P. 1–12. DOI: 10.1155/2019/8389368.
3. Shabi H., Khezri S., Ahmad B.B., Allahvirdiasl H. Application of Satellite images and fuzzy set theory in Landslide hazard Mapping in Central Zab basin. *IOSR Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 1. Iss. 4. P. 17–24. DOI: 10.9790/4861-0141724.
4. Polikar R. Ensemble learning. *Ensemble machine learning*. Springer, Boston, MA, 2012. P. 1–34. DOI: 10.1007/978-1-4419-9326-7_1.
5. Lee J., Kang M. Geospatial Big Data: Challenges and Opportunities. *Big Data Research*, 2017. Vol. 2 (2). P. 74–81.
6. Николаев В.А. Ландшафтоведение. М.: Изд. МГУ, 2000. 94 с.
7. Николаев В.А. Landscape Science. М.: Изд. МГУ, 2000. 94 p. (in Russian).
8. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
9. Викторов А.С. Landscape Figure. М.: Mysl, 1986. 179 p. (in Russian).
10. Ямашкин А.А., Новикова Л.А., Ямашкин С.А., Яковлев Е.Ю., Уханова О.М. Пространственная модель ландшафтов западных склонов Приволжской возвышенности // Вестник Удмуртского университета. Серия. Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25. № 3. С. 124–132.
11. Yamashkin A.A., Novikova L.A., Yamashkin S.A., Yakovlev E.Yu., Ukhanova O.M. Spatial model of landscapes of Volga Upland western slopes // *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya. Biologiya. Nauki o Zemle*. 2015. V. 25. № 3. P. 124–132 (in Russian).
12. Yamashkin S., Radovanovic M., Yamashkin A., Vukovic D. Using ensemble systems to study natural processes. *Journal of Hydroinformatics*. 2018. Vol. 20 (4). P. 753–765. DOI: 10.2166/hydro.2018.076.