

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОГЕННОГО ФАКТОРА НА ОПОЛЗНЕОПАСНОМ ГОРНОМ СКЛОНЕ

Ю. Г. Алешин

Институт геомеханики и освоения недр НАН КР

Как показывает практика оползневых исследований решающее влияние на активность гидрогенных оползней оказывают подземные воды (ПВ) в период их подъема с марта по июнь для региона юго-западного Тянь-Шаня. Коэффициент корреляции между уровнем ПВ и скоростью смещения оползня (u) достигает значения от 0,5 до 0,6. При этом необходимо иметь в виду то обстоятельство, что пьезометрические скважины на оползневом участке весьма немногочисленны и пройдены зачастую не в активной части оползня, т.е. оценка УПВ в оползневом теле является косвенной. В тех случаях, когда удастся провести измерения этого уровня непосредственно в пределах оползневого тела [1], можно получить достаточно тесную нелинейную связь u (H) с коэффициентом детерминации $R^2 > 0.9$.

Для каждого конкретного оползня влияние ПВ на оползневую активность своеобразное, специфическое и проявляется с различной степени определенности. В одних случаях оно комплексное: повышается поровое и фильтрационное давление, изменяются физико-механические характеристики грунтов в плоскости скольжения. Этот комплекс факторов нарушает устойчивость горного склона и определяет скорость смещения оползневых масс вплоть до катастрофического обрушения. В других случаях это влияние сказывается лишь в части незначительного изменения физико-механических свойств, активируя сезонное смещение

оползней. В зависимости от состояния нарушенности грунтов неустойчивой части горного склона или отдельных его участков, которое к тому же изменяется в процессе оползневого движения и особенностей гидро-геологического режима в ближней и дальней зонах питания ПВ, их влияния на оползневую активность даже в пределах одного и того же склона нестационарно и в точности неповторимо из года в год. Тем не менее, повышение уровня ПВ на конкретном оползневом склоне либо включает в действие большое число гидрогенных факторов оползневой активности, либо увеличивает интенсивность влияния одного или каждого из них, либо захватывает влиянием все большее число локальных участков и объёмов потенциальной и действующей оползневой массы. В любом случае прогноз уровня ПВ на предстоящий весенний период позволит вынести суждение об ожидаемой оползневой активности.

Организации МЧС обычно разрабатывают прогнозы возможных катастрофических событий на предстоящий год на основе гидрометеорологических прогнозов. Это в первую очередь относится к оползневым явлениям в неустойчивых грунтах. Однако до сих пор такой прогноз основывается на интуитивных, эвристических соображениях и обобщении опыта практических наблюдений. Комбинируя математические методы имитационного и нейросетевого моделирования, нами была создана и исследована прогнозирующая модель, позволяющая провести детальное описание динамики ожидаемого подъема уровня ПВ на оползневом участке на период первого полугодия предстоящего года. Основная идея технологии такого моделирования заключается в использовании качественных и количественных гидрометеорологических прогнозов для территории актуального субрегиона на предстоящий зимне-весенний период, гидрогеологических свойств грунтов оползнеопасного склона и геометрически-пространственных соотношений оползневой площадки и

зоны атмосферного питания ПВ, а при получении реальных гидрометеорологических данных в зимний период – в комплексном использовании реальных и прогнозных данных на предстоящий период.

Предикторами прогнозной процедуры являются зимнее (Q_3) с 1.12. по 28.02. и весеннее (Q_6) с 1.03. по 31.05., количество атмосферных осадков с указанием среднемесячного значения; зимняя (T_3°) и весенняя (T_6°) температура воздуха с указанием среднемесячного значения; интенсивность осадков (h_3, h_4, h_5) среднемесячная в марте, апреле и мае; время (горизонт) прогноза (t_n), отсчитываемое с начала декабря года, предшествующего прогнозному. Факторами прогнозной процедуры являются: пьезоуровнепроводимости (α) грунтов оползнеопасного склона; протяженность (ΔL) по склону зоны атмосферного питания ПВ, расстояние (L) от центра этой зоны до оползневой площадки. Технология моделирования включает: дискретизацию и классификацию предикторов в виде двух гидрометеорологических матриц (зимняя и весенняя) $QT_{\text{ЗМН}}^\circ$ и $QT_{\text{ВСН}}^\circ$ размера 7×7 , содержащих по 49 элементов (классов или типов гидрометеорологической обстановки); нормализацию и кодификацию элементов матриц $(X_1, X_2)_{\text{ЗМН}}$, $(X_3, X_4)_{\text{ВСН}}$, интенсивности осадков весенних месяцев в рамках семи классов и рандомизация временных интервалов (X_5, X_6, X_7), а так же момента времени, на который формируется прогноз (X_8).

Формирование общей гидрогеологической модели как случайной комбинации всех рассматриваемых предикторов $\{X_i\}$, $i \in (1, 8)$ по правилам методики планирования эксперимента. Нами использован ротатабельный план второго порядка Бокса-Хантера в виде полуреплики 2^{K-1} , где $K=8$, при этом динамика изменения уровня ПВ во времени t , соответствующая каждой комбинации предикторов, определялась по формуле

$$\Delta H = \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K \frac{1}{m} (E_{sk} - E_{s(k-1)}) \cdot (t - t_{sk}) Y_{sk} (1)$$

где: индекс k показывает порядковый номер в череде периодов выпадения атмосферных осадков, начиная с момента времени снеготаяния; S – порядковый номер участка в пределах водосборной (для оползня) площади, на котором осуществляется снеготаяние или выпадение жидких осадков; E_{sk} – интенсивность эффективной инфильтрации осадков как разности между выпадающими жидкими или стаивающими твердыми осадками h_{sk} и испарением $\varepsilon_{исп.sk}$ с земной поверхности; Y_{sk} – сложная функция, объединяющая пространственно-геометрические (L, L_{sk}), временные (t, t_{sk}) и гидродинамические (α) характеристики горного массива [2] и выраженная через кратные интегралы вероятности $i^2 \operatorname{erfc}(\cdot)$:

$$Y_{sk} = 2 \left[i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{L - L_{s2}}{2\sqrt{\alpha(t - t_{sk})}} \right) + i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{L + L_{s2}}{2\sqrt{\alpha(t - t_{sk})}} \right) - i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{L - L_{s1}}{2\sqrt{\alpha(t - t_{sk})}} \right) - i^2 \operatorname{erfc} \left(\frac{L + L_{s1}}{2\sqrt{\alpha(t - t_{sk})}} \right) \right]$$

Пример реализации комплекса входных воздействий (предикторов) факторного эксперимента из 164 приведен на рис.1.

Данные имитационного моделирования позволили сформировать базу данных $\{x_{ij}, \Delta H_j\}$, $i = 1, 2, \dots, 8$; $j = 1, 2, \dots, 164$ для разработки нейросетевой прогнозирующей модели $\widehat{\Delta H} = f(X_1, X_2, \dots, X_8)$. Из 2000 нейросетей с архитектурой многослойного персептрона (MLP) была выбрана по результатам обучения наилучшая с высокими показателями производительности (коэффициента корреляции между ΔH и комплекса $\{X_i\}$, $i = 1, 2, \dots, 8$ по контрольной и тестовой подвыборкам. Некоторые важные характеристики этой нейросети приведены на комплексном рис.2. Анализ чувствительности прогноза к входным данным показывает четыре группы влияющих факторов: наибольшей чувствительностью сеть обладает по отношению к переменной X_8 –

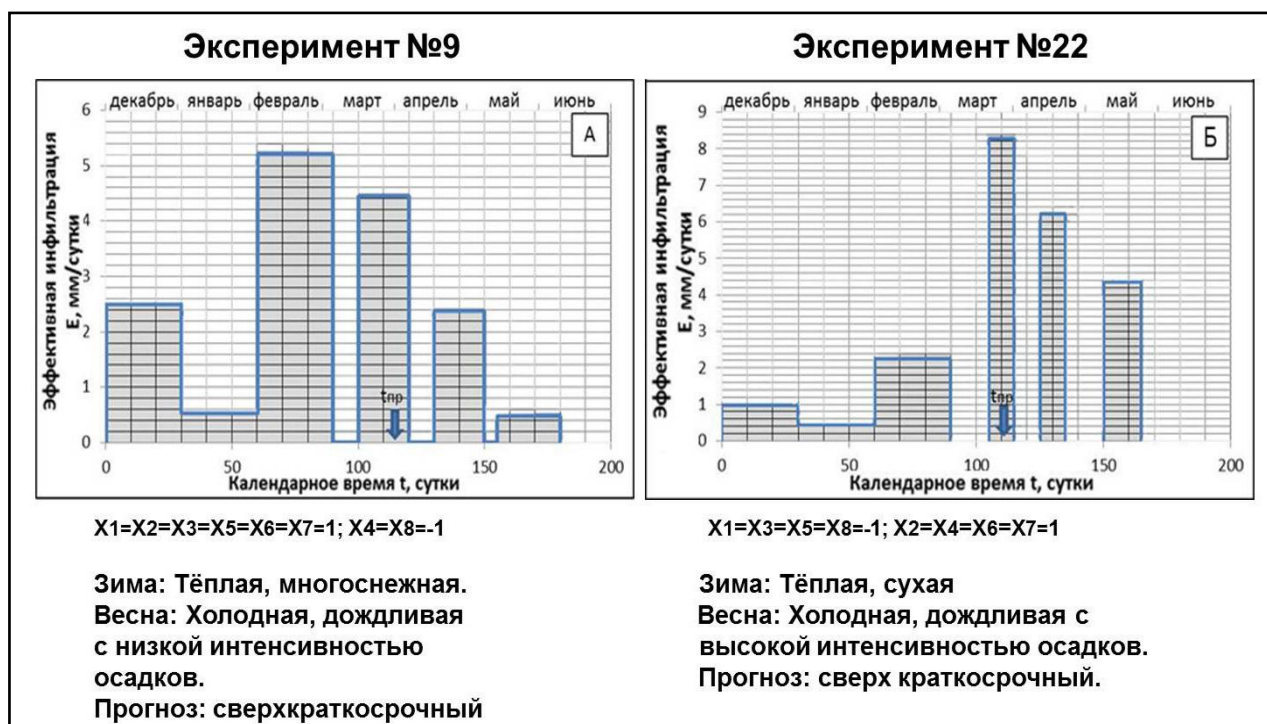


Рис.1. Примеры реализации сквозных воздействий в факторном эксперименте Бокса-Хантера

моменту времени (горизонту) прогноза; вторым по значимости является фактор зимних осадков X_1 ; третьим – два фактора X_2 (температура зимнего периода) и X_3 (количество весенних осадков) с приблизительно одинаковым влиянием; четвертая группа факторов X_4 (температура весеннего периода) и интенсивность осадков X_5, X_6, X_7 в любой весенний месяц оказывают наименьшее влияние на величину ΔH . Большое влияние временного фактора X_8 вполне объяснимо: при любом количестве осадков кривая роста уровня ПВ в разные годы мало изменяется (минимум в декабре – январе, максимум в апреле – июне). Зимние осадки (фактор X_1) большей частью инфильтруются в массив грунтов, пополняя запасы ПВ; этим объясняется большое влияние этого фактора на величину ΔH . По мере возрастания температура воздуха весной уменьшается эффективность инфильтрации выпавших осадков, возрастают показатели испарения с поверхности грунта, десукция и транспирация влаги растениями, что и

определяет наименьшее воздействие четвертой группы факторов на динамику уровня ПВ.

Нейросетевой автомат позволяет синтезировать кривую гидрогеологического бугра $H(t)$ на оползнеопасном участке горного склона при любой комбинации влияющих факторов $\{X_i\} i = 1, 2, \dots 8$.

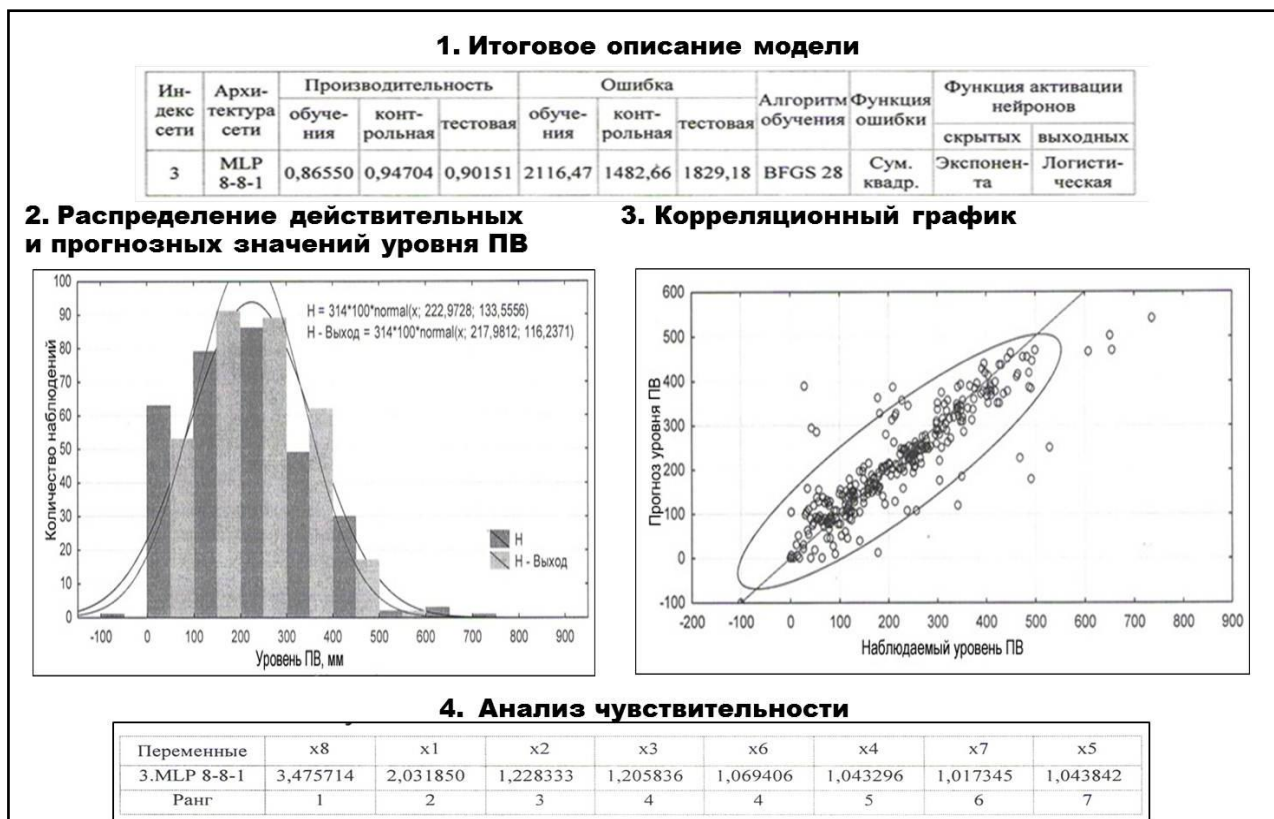


Рис.2. Основные показатели качества нейросетевой модели

На рис.3 приведены эти зависимости для ряда комбинации влияющих факторов, уровни которых были выбраны специально из ряда экспериментальных значений с тем, чтобы более явно продемонстрировать различие в амплитуде и форме гидрогеологического бугра, синтезируемого нейросетевым автоматом. Аналитическая аппроксимация кривых возможна одной функцией, показанной на рис. 3, при различных значениях параметров a, b, c, d, g, k . Существенные различия в скорости подъёма уровня ГВ, их амплитуде и моменте наступления максимума определяют время возможного

опасного проявления оползневой активности на анализируемом участке оползнеопасного склона.

Описанная выше технология комплексного моделирования нестационарной гидродинамической задачи о формировании уровня ПВ под влиянием группы факторов, в том числе гидрометеорологических, выраженных в качественной форме, позволяет синтезировать прогнозирующий нейросетевой автомат. При наличии данных о показателях пьезоуровнепроводимости грунтов на водосборной (для оползневой участка) площади, геометрических соотношений положения оползнеопасного участка относительно зоны атмосферного питания ПВ

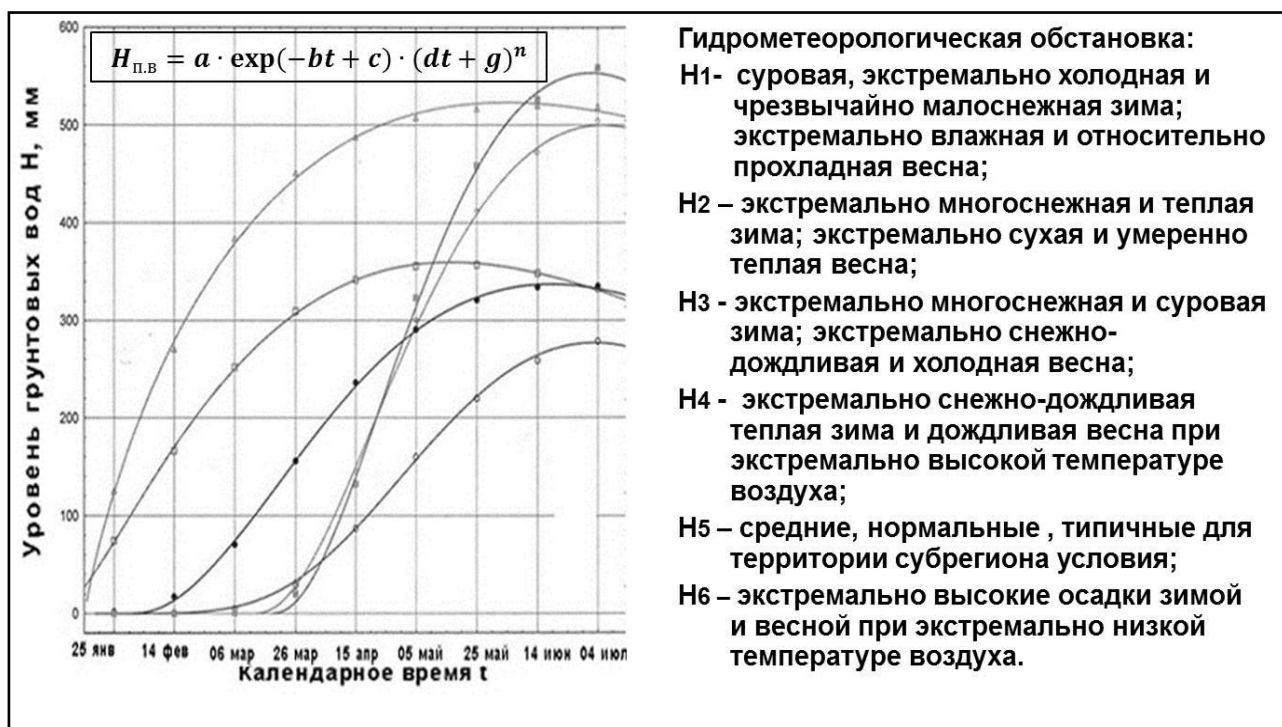


Рис.3. Комбинации предикторов тестового подмножества и отклик нейросетевого автомата, характеризующий динамику УПВ на оползнеопасном участке горного склона

и гидрометеорологической обстановки можно получить в аналитической форме закономерности формирования гидрогеологического режима на оползневых участках. Появляется возможность выявить наиболее опасные для формирования оползней комбинации числовых значений

или даже качественных градации гидрометеорологических факторов предстоящего зимне-весеннего периода, вызывающих или резкий подъем уровня ПВ, его высокую амплитуду или длительность высокого стояния ПВ. При этом ранжируется роль отдельных факторов, определяющих показатели динамики уровня ПВ и, следовательно, требования к качеству их прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Corominas J., Moya J. et al. Prediction of ground displacements and velocities from ground water level changes at the Vallcebre landslide //Landslides. 2005. № 2.pp 83-86
2. Полубаринова–Кочина П.Я., Пряжинская В.Г., Эмих В.Н.
Математические методы в вопросах орошения. М.: Наука, 1969.
414с